

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA BIOLÓGICO
PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LA INDUSTRIA
ACUÍCOLA**



EDWIN JAVIER DUARTE GÓMEZ

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

2018

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA BIOLÓGICO
PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LA INDUSTRIA
ACUÍCOLA**



EDWIN JAVIER DUARTE GÓMEZ

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
Magister en Ingeniería Ambiental**

Directora

ALBA LUCÍA ROA PARRA PhD

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
MAESTRIA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

2018

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a Dios, por regalarme tantas bendiciones cada día, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecerme en mis dificultades, por iluminar mis pensamientos y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio como lo son mis amados padres, mi hermana y mi amada esposa

*De manera muy especial quiero dedicar este proyecto a mi hermosa hija Lauren Gabriela a quien amo con todo mi corazón, siempre serás el mejor regalo que me ha dado la vida, sin ti mis días no serían los mismos, eres mi más grande inspiración y mi motivo para ser mejor cada día.
¡Te amo Hija!*

En la vida ni el oro ni la plata vale más que la familia y la tranquilidad. La sabiduría no se cambia ni por el más grande tesoro.

AGRADECIMIENTOS

A mi papá Eduvin, por quererme, preocuparse por mí, porque con sus esfuerzos me ha dado lo necesario para crecer como persona día a día, porque sé que se siente orgulloso de la persona en la que me he convertido.

A mi mamá Consuelo, por darme la vida, creer en mí, por apoyarme en todo momento, por sus consejos y por su motivación constante, por enseñarme a ser paciente y por contagiarme la alegría de vivir todos los días como si fuera el último, pero sobretodo, por su amor.

A mi hermana Witney, por estar siempre presente acompañándome, por creer en mi capacidad para conseguir esta meta, espero seguir siendo un ejemplo para ti.

A mi princesa Laura, por su apoyo constante y amor incondicional, por ser mi amiga y compañera, por compartir momentos de alegría y frustraciones a mi lado, por demostrarme que siempre puedo contar con ella, gracias mi amor.

Quiero darles las gracias a todos los profesores, especialmente a la Dra. Alba Lucía Roa y a la Dra. Gladys Montañez por su gran apoyo y motivación en la realización de este proyecto, por su tiempo compartido y por impulsar el desarrollo de mi formación profesional.

Gracias a la Universidad de Pamplona a través de la Vicerrectoría de Investigaciones por el apoyo en la financiación del proyecto.

A la señora Luz Marina Valderrama, propietaria de la Granja Piscícola El Rincón, por su apoyo en el desarrollo de este proyecto y su compromiso en el cuidado del medio ambiente.

A mis compañeros de maestría, cómplices de esta grandiosa aventura, grandes personas y profesionales, gracias por sus consejos y su amistad.

A mis amigos y demás familiares que de una u otra forma me ayudaron y estuvieron a mi lado animándome para cumplir esta meta.

CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN	
1. OBJETIVOS.....	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2 MARCO REFERENCIAL.....	15
2.1 Antecedentes.....	15
2.2 Bases conceptuales.....	26
2.3 Marco teórico.....	28
2.3.1 La industria acuícola.....	28
2.3.1.1. Visión general del sector acuícola en Colombia.....	28
2.3.1.2 Historia y visión general.....	29
2.3.2 La Trucha – Introducción.....	31
2.3.2.1 Generalidades de la trucha.....	32
2.3.2.2 Etapas del cultivo.....	33
2.3.2.3 Distribución y características de los sistemas de cultivo.....	36
2.3.2.4 Sistemas de cultivo.....	36
2.3.2.5 Contribución a la economía.....	37
2.3.3 Efectos ambientales del desarrollo de la acuicultura.....	38
2.3.4 Desarrollo sostenible.....	39
2.3.5 Competitividad.....	42
2.3.6 Aguas residuales.....	44

2.3.6.1	Tratamiento de aguas residuales.....	45
2.3.6.2	Biorremediación.....	48
2.3.7	Microalgas.....	49
2.3.7.1	Medición del crecimiento celular.....	52
2.3.7.2	Cultivo de microalgas.....	52
2.4	Normatividad Ambiental Colombiana para la acuicultura.....	61
2.4.1	Política Nacional de Pesca y Acuicultura – PNPA.....	64
2.4.2	Plan Nacional de Desarrollo – PND 2014 – 2018.....	64
3.	METODOLOGIA.....	66
3.1	Enfoque de la Investigación.	66
3.2	Zona de estudio.....	66
3.3	Fases de la Investigación.....	68
3.3.1	FASE I.	68
3.3.1.1	<i>Medición de los tanques de crianza y volúmenes de agua.....</i>	68
3.3.1.2	<i>Medición de la cantidad de agua.....</i>	69
3.3.1.2	<i>Recambio de agua en estanques.</i>	70
3.3.1.4	<i>Toma de muestras.</i>	70
3.3.1.5	<i>Análisis fisicoquímico.</i>	70
3.3.1.6	<i>Análisis bacteriológicos.....</i>	72
3.3.2	FASE II	73
3.3.2.1	<i>Aislamiento de Microalgas.....</i>	73
3.3.2.2	<i>Fotobiorreactores evaluación de biorremediación.....</i>	73
3.3.2.3	<i>Análisis estadístico.....</i>	73
3.3.2.4	<i>Criterios de diseño del sistema de tratamiento biológico.....</i>	74

3.3.3	FASE III.....	91
3.3.3.1	<i>Montaje del sistema de tratamiento biológico.....</i>	92
3.3.3.2	<i>Arranque y operación del sistema de tratamiento.....</i>	95
3.3.4	<i>Análisis estadístico.....</i>	102
4.	RESULTADOS Y ANALISIS.....	103
4.1	FASE I	103
4.2	FASE II	106
4.2.1	Aislamiento de Microalgas.....	106
4.2.2	Preparación de inóculos.....	109
4.2.3	Evaluación de la Biorremediación.....	110
4.2.4	Balances de materia y energía para Biorreactor Discontinuo con Aireación... 113	
4.3	FASE III.....	120
4.3.1	Monitoreo de los fotorreactores airlift y laminar.....	120
4.3.2	Productos obtenidos a partir del desarrollo del proyecto.....	123
4.3.3	Propuesta de diseño del sistema de tratamiento biológico para la industria acuícola a escala real.....	131
5.	CONCLUSIONES.....	136
6.	RECOMENDACIONES.....	138
	BIBLIOGRAFÍA	

INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Estanques de crecimiento.....	37
Figura 2. Ubicación de la granja piscícola El Rincón.....	67
Figura 3. Distribución de puntos de muestreo.....	71
Figura 4. Toma de muestras y análisis fisicoquímico.....	72
Figura 5. Tanque de alimentación.	76
Figura 6. Evaluación de solidos sedimentables antes y después de 1h.....	78
Figura 7. Diseño del sedimentador primario.....	80
Figura 8. Sedimentador primario.....	83
Figura 9. Diseño de los lechos de secado de lodo.	84
Figura 10. Lechos de secado de lodos.....	85
Figura 11. Residuos de lechos de secado.....	87
Figura 12. Diseño del fotorreactor airlift.....	88
Figura 13. Fotorreactor airlift.....	89
Figura 14. Fotorreactor laminar.....	90
Figura 15. Fotorreactor laminar.....	91
Figura 16. Armado de la estructura del sistema.....	93
Figura 17. Limpieza de los equipos a utilizar.....	93
Figura 18. Distribución final de los componentes en el sistema.....	94
Figura 19. Prueba hidráulica del sistema.....	95
Figura 20. Carga del tanque de alimentación.....	96
Figura 21. Sedimentador primario con un tiempo de retención de 0, 1.5 y 3 h.....	97

Figura 22. Llenado de los fotorreactores con el agua tratada en el sedimentador.....	97
Figura 23. Arranque de los fotorreactores.....	98
Figura 24. Lodo residual del sedimentador primario en los lechos de secado.....	99
Figura 25. Esquema del sistema biológico a implementar.....	100
Figura 26. Tratamiento biológico para efluentes de la industria acuícola.....	101
Figura 27. Cepa CCBio1 correspondiente a <i>Chlorella sp</i> y B. CCBio2 correspondiente a <i>Scenedesmus sp.</i>	106
Figura 28. Cepa de <i>Arthrospira sp</i>	107
Figura 29. Productos obtenidos a partir de nuestro sistema de tratamiento.	117
Figura 30. Abono orgánico a partir de los lodos residuales.....	118
Figura 31. Biomasa del consorcio de microalgas CcBIO1-CcBio2.....	119
Figura 32. Agua residual tratada biológicamente en los fotorreactores.....	120
Figura 33. Ingredientes para la preparación de la comida casera de la trucha.....	121
Figura 34. Receta casera tradicional con harina de sangre y con harina de microalgas.....	122
Figura 35. Alimentación de los peces con el concentrado a base de microalgas.	122

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Medición de los tanques de crianza, volumen de los tanques y volúmenes de agua.....	69
Tabla 2. Actividad de <i>Chlorella</i> sp en la remoción de Nitratos y fosfatos de agua residual.....	110
Tabla 3. Actividad de <i>Scenedesmus</i> sp en la remoción Nitratos y fosfatos de agua residual.....	111
Tabla 4. Actividad de <i>Arthrospira</i> sp en la remoción de Nitratos y fosfatos de agua residual.....	111
Tabla 5. Porcentajes de remoción de contaminantes para el fotorreactor laminar.....	120
Tabla 6. Porcentajes de remoción de contaminantes para el fotorreactor airlift.....	121
Tabla 7. Ventajas y desventajas del material de construcción de tratamiento biológico.....	134

INDICE DE ANEXOS

	Página
Anexo 1. Carta de solicitud de acompañamiento técnico proyecto Eco turístico.....	153
Anexo 2. Tests Spectroquant® usados para análisis de las aguas residuales.....	154
Anexo 3. Medios de cultivo para el crecimiento de microalgas.....	157
Anexo 4. Constancias de capacitación a la propietaria en el acompañamiento y asesoría técnica del proyecto Ecoturístico en la Finca El Rincón.....	159

INTRODUCCIÓN

Aunque hace algunos años se viene promoviendo la implementación de prácticas que contribuyan a mitigar los efectos negativos producidos por la acuicultura sobre el medio ambiente, éstas se ha dificultado por las limitantes económicas actuales, la resistencia al cambio y a invertir más allá de lo estrictamente necesario, además de las dificultades de acceder a tecnologías más limpias y a la dinámica del mercado en todos los niveles. Es necesario trabajar la gestión ambiental conjuntamente con el proceso productivo, de tal forma que permita introducir y aplicar los conceptos de producción más limpia de forma integral, enfatizando en la prevención de la contaminación, en la minimización y el aprovechamiento económico de los residuos como principales opciones para reducir las cargas contaminantes dispuestas al medio ambiente.

Existen diversos factores que todo acuicultor debe tener en cuenta dentro del cultivo y la producción: aspectos ambientales, técnicos, organizacionales y de gestión empresarial que no pueden manejarse de forma independiente, ya que hacen parte integral del desarrollo de la actividad. La ausencia de estos conocimientos tecnológicos y un manejo ambiental inadecuado en el manejo de los residuos del cultivo de Trucha existente en la Finca El Rincón, ubicada en la Vereda Presidente del municipio de Chitagá, causa la pérdida del paisaje de la laguna Comagüeta, debido al aumento de la concentración de nitrógeno y fósforo en el cuerpo receptor, disminuyendo el oxígeno disponible, generando eutrofización de la laguna, estimulando la aparición de algunos organismos y la ausencia de otros, y alterando gravemente el ecosistema. Los impactos ambientales mencionados fueron identificados a lo largo del proceso productivo, para mejorar las prácticas de producción y diseñar un sistema que garanticen un mejor uso y aprovechamiento de los recursos naturales, de materias primas e insumos, con el fin de obtener beneficios ambientales,

económicos y sociales.

El objetivo principal de la investigación fue realizar el diseño de un sistema biológico para el tratamiento de efluentes de la piscifactoría de la finca El Rincón, además de acompañamiento, asesoría y asistencia técnica para el mantenimiento del cultivo de trucha. Para el desarrollo de esta propuesta de investigación se caracterizó físico-químicamente y microbiológicamente las aguas residuales procedentes de la industria acuícola y así se determinó la carga contaminante del proceso; posteriormente se trabajó en la biorremediación de los contaminantes encontrados, se determinaron las principales características de operación y condiciones de cultivo para la implementación del sistema y posteriormente se evaluó la remoción del sistema biológico mediante el monitoreo de los contaminantes presentes en el efluente.

Para diseñar y llevar un tratamiento de aguas residuales, es necesario que se conjuguen dos condiciones básicas: cultura medioambiental del empresario que le permita entender la relación industria-ambiente; y conocimiento de los residuos que genera la actividad y la potencialidad de éstos, aspectos con los cuales está comprometida la propietaria. Con esta investigación se presentaron recomendaciones sobre algunas prácticas de manejo, para prevenir, corregir, mitigar o compensar los impactos ambientales negativos que se derivan de esta actividad. La vinculación de la Universidad de Pamplona a este proyecto contribuyó a incrementar la productividad y competitividad de la empresa y su actividad acuícola por medio de nuevos conocimientos y tecnologías que se transfirieron por medio de capacitaciones; esta interacción sumada a la participación de la Administración local contribuyó a la innovación, que es un factor prominente para el desarrollo de un proyecto Eco turístico que se piensa desarrollar alrededor de la Laguna y la Cascada Comagüeta. (Ver Anexo 1).

1. OBJETIVOS

1.3 Objetivo General

Realizar el diseño y la evaluación de un sistema biológico para el tratamiento de efluentes de la industria acuícola que proporcione una solución sostenible frente a los problemas de contaminación generados por los vertimientos de los mismos en la Laguna Comagüeta, en la Vereda Presidente del municipio de Chitagá, Norte de Santander.

1.4 Objetivos Específicos

- ✓ Realizar la caracterización físico-química y microbiológica del agua residual procedente del cultivo de trucha para determinar la carga contaminante.
- ✓ Seleccionar los elementos del bioproceso para el diseño y la construcción del sistema biológico a implementar
- ✓ Evaluar el sistema biológico propuesto para el tratamiento de las aguas residuales de la piscifactoría en estudio

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 Antecedentes

Al recopilar la información existente sobre la temática, se observa que existen diversos factores que todo cultivador debe tener en cuenta dentro del cultivo y la producción acuícola: aspectos ambientales, técnicos, organizacionales y de gestión empresarial que no pueden manejarse de forma independiente, ya que hacen parte integral del desarrollo de la actividad.

La industria acuícola genera una cantidad de impactos ambientales a lo largo del proceso productivo, por eso para mejorar las prácticas actuales de producción se han diseñado sistemas preventivos que garantizan un buen uso y aprovechamiento de los recursos naturales, materias primas e insumos con el fin de obtener beneficios ambientales, económicos y sociales.

Aunque hace algunos años se viene promoviendo la implementación de prácticas que contribuyan a mitigar los efectos negativos producidos por la acuicultura sobre el medio ambiente, éstas se han dificultado por las limitantes económicas actuales, la resistencia al cambio y a invertir más allá de lo estrictamente necesario, además de las dificultades de acceder a tecnologías más limpias y la dinámica del mercado en todos los niveles. Una alternativa para los residuos de la industria acuícola, particularmente para las aguas residuales, es la ficorremediación, referida al uso de microalgas para la remoción de carga orgánica, fosfatos y nitratos, aplicado como tratamiento secundario.

Es necesario trabajar la gestión ambiental conjuntamente con el proceso productivo, de tal forma que permita introducir y aplicar los conceptos de producción más limpia de forma integral, enfatizando en la prevención de la contaminación, en la minimización y el aprovechamiento económico de los residuos como principales opciones para reducir las cargas contaminantes dispuestas al medio ambiente.

Con la meta de proporcionar una solución sostenible frente a los problemas de contaminación generados por los vertimientos de los mismos en la Laguna Comagüeta, y la mitigación de los impactos negativos del cambio climático sobre la misma, se diseñó un sistema biológico junto a acompañamiento, asesoría y asistencia técnica para el mantenimiento del cultivo de trucha.

Existen una gran cantidad de artículos y publicaciones científicas con respecto la industria acuícola y el impacto que esta causa al medio ambiente, resaltando la importancia de prevenir, corregir, mitigar o compensar los impactos ambientales negativos que pueden derivarse de la actividad y que puedan afectar notablemente la respuesta adecuada del ecosistema lagunar al cambio climático.

En Colombia, la producción acuícola durante la década del 90 fue de 46.705 toneladas, presentando un crecimiento medio anual del 30%, intensificándose a través del uso de tecnologías más avanzadas, manejo técnicamente adecuado, equipos y adecuaciones a las normas y exigencias para exportar el producto (Lizarralde, 2014). Según Beltrán (Beltrán, 2013), la acuicultura contribuye significativamente con la seguridad alimentaria y la disminución de la pobreza en el mundo, ya que puede suministrar proteínas de excelente calidad y generar empleo (Barbosa, 2008). La industria acuícola, al igual que otras actividades económicas, usa y transforma los recursos en

productos con un valor económico y social; al hacerlo produce desechos que, a su vez, requieren de otros servicios ambientales para ser asimilados o reciclados. (Buschmann, 2001)

Aunque hace algunos años se viene promoviendo la implementación de prácticas que contribuyan a mitigar los efectos negativos producidos por la acuicultura sobre el medio ambiente, éstas se han dificultado por las limitantes económicas actuales, la resistencia al cambio y a invertir más allá de lo estrictamente necesario, además de las dificultades de acceder a tecnologías más limpias y la dinámica del mercado en todos los niveles. La intervención intensiva que generan las prácticas acuícolas va degradando el medio ambiente: primero por la utilización del agua que recibe grandes cantidades de desechos, como el alimento no consumido por los peces que sedimenta al fondo de los tanques de crianza; segundo porque se introducen antibióticos y sustancias químicas al ecosistema, necesarias para realizar la actividad y finalmente se genera una enorme cantidad de desechos en el proceso de faena del producto que muchas veces termina en los cursos de agua. A esto se agrega que una significativa porción de los nutrientes quedan disueltos en la columna de agua, produciendo fenómenos de eutrofización. Este impacto tiene un costo ambiental, económico y social. Para mitigar los impactos ambientales especialmente la calidad de agua (Boyd, 2003) se recomienda la aplicación de mejores prácticas de manejo para mejorar la calidad y reducir el volumen empleado. Según (Neorr & Buscnvr, 2003) los métodos integrales de biotransformación, además de traer beneficios ecológicos y sociales, permiten producciones adicionales de biomasa sin costos de insumos. En este sentido, los microorganismos y entre estos, el fitoplancton han demostrado ser eficientes en la asimilación de amonio, nitrito y fósforo de fuentes alimenticias. (Pardo, Suárez, & Soriano, 2006) (Roa Parra & Cañizares Villanueva, 2012), estudiaron la remoción de nitratos y fosfatos del medio de cultivo Bold utilizando *Scenedesmus incrassatulus* inmovilizado en alginato de calcio, como una nueva alternativa tecnológica y obtuvieron una

remoción del 60% de nitratos y 47% de fosfatos. (Avila Peltroche, 2015), utilizó *Chlorella* sp y *Chlamydomonas* sp para remediar aguas residuales municipales; los mejores resultados los presentó *Chlorella* sp libre en el día 10 con un porcentaje de remoción de nitratos de 71.25% y de 83,69% de fosfatos. Los cultivos inmovilizados de ambas especies reportaron valores altos de remoción, entre 56% a 67% para nitratos y 78% a 81% para fosfatos; este último fue removido en 24 horas en la mayoría de los cultivos. (Arévalo & Malo, 2017), realizaron un biotratamiento de aguas residuales utilizando la microalga *Chlorella vulgaris* siendo el cultivo realizado con microalga adaptada a un porcentaje en volumen de microalga de un 10% la que mejores resultados reportó (81,80% por DQO y 89,91% por SST), sirviendo como tratamiento complementario. (Melissa, 2014), realizó una investigación de ficorremediación de unas residuales acuícolas y obtuvo la mejor asimilación de amonio, nitritos y fosfatos utilizando *Tetraselmis chui* mas un consorcio microbiano; mientras que para los nitratos no se presentaron diferencias significativas con los tratamientos de la microalga *Chlorella capsulata* y los consorcios microbianos. (Pizarro H., 2012), trabajó Biorremediación de aguas residuales acuícolas con *Chlorella* sp y registró los mejores resultados de remoción de nitrito, de 91.67% y 88.41%, en las condiciones indoor y outdoor. El nitrato fue removido en un 57.47% y 29.31% para las condiciones indoor y outdoor. En cuanto a la remoción de amonio los valores fueron de 42.22% para ambas condiciones experimentales. Finalmente, el fosfato registro una remoción del 65.78% en indoor y un 75.78% en outdoor.

Usualmente, las actividades humanas producen cambios en los ecosistemas, los que, muchas veces, generan efectos adversos en el medio ambiente. En ese contexto la acuicultura, al igual que otras actividades económicas, usa y transforma los recursos en productos con un valor económico y social, al hacerlo produce desechos que, a su vez, requieren de otros servicios ambientales para

ser asimilados o reciclados (Buschmann, 2001). Por ello, el impacto sobre el medio ambiente emerge de estos tres procesos: el consumo de recursos, el proceso de transformación y la generación de productos

Para diagnosticar los impactos ambientales se hizo una correlación de las actividades realizadas para el montaje y desarrollo del cultivo de trucha con cada uno de los impactos potenciales en el ecosistema. Esta evaluación sirvió de base para la realización del manejo ambiental de los procesos en la industria acuícola.

El recurso agua es afectado por la captación de agua que se le realiza del Rio Comagüeta utilizada para el desarrollo de la industria acuícola generando una disminución del caudal de la fuente hídrica con tendencia estable y en segundo lugar la afectación de la Laguna Comagüeta que es el cuerpo receptor de las aguas residuales de la industria, afectando su funcionalidad, vital para el hombre por ser un reservorio de diversidad biológica y cultural de la región; además, cumple un papel importante frente al cambio climático, puesto que contribuye al ciclaje de nutrientes, el almacenamiento de agua, la autodepuración de aguas contaminadas y la aminoración de inundaciones y sequias.

Los impactos generados por la actividad agrícola también están relacionados con la modificación de las características del paisaje y la contaminación visual. La modificación del paisaje suele ser permanente debido a la pérdida de suelo y de otros componentes que no pueden ser sustituidos, tiene una tendencia a crecer debido a que se ve afectado cada vez más espacio del medio, genera un gran cambio ambiental y puede corregirse con el empleo de un manejo ambiental; la contaminación visual es temporal, tiende a crecer, posee una magnitud alta, suele ser tratada

con medidas ambientales y alberga una importancia ambiental baja.

La intervención intensiva que generan las prácticas acuícolas va degradando el medio ambiente: primero por la utilización del agua que recibe grandes cantidades de desechos, como el alimento no consumido por los peces que sedimenta el fondo de los tanques de crianza; segundo porque se introducen antibióticos y sustancias químicas al ecosistema, necesarias para realizar la actividad y finalmente se genera una enorme cantidad de desechos en el proceso de faena del producto que muchas veces termina en los cursos de agua. A esto se agrega que una significativa porción de los nutrientes quedan disueltos en la columna de agua, produciendo fenómenos de eutrofización. Este impacto tiene un costo ambiental, económico y social y la pregunta que surge es: ¿esto es sustentable en el tiempo?

La demanda de agua y de espacio es imprescindible para el desarrollo de prácticas de acuicultura: la primera se usa como soporte para el cultivo de las especies acuáticas, dependiendo del tipo de organismos en cultivo como proveedora de oxígeno y otros nutrientes; y como reservorio para los elementos de desechos, los que pueden tener diversos efectos sobre el medio ambiente. Otra de las formas a través de las cuales puede impactar la acuicultura al medio ambiente es a través de alimentación de los alevinos, tanto en la columna de agua como en el fondo de los tanques de crianza, como ocurre en el caso de la Laguna Comagüeta.

Las investigaciones que se recopilan en este estudio han detectado que este último fenómeno afecta aumentando la cantidad de nitrógeno y fósforo de los sistemas acuáticos, disminuyendo el oxígeno disponible, generando eutrofización, estimulando la aparición de algunos organismos y la ausencia de otros, y alterando gravemente los ecosistemas acuáticos. Se ha estimado en diferentes

regiones, organismos y sistemas de cultivo, que más del 60% del fósforo (P) y el 80% del nitrógeno (N), aportado por los desechos de las especies cultivadas, termina, finalmente en la columna de agua (Pettersson, 1988). Estos cambios en la columna de agua incluirían alzas en los niveles de nutrientes (N y P); aumento de la materia orgánica disuelta; una reducción de la concentración de oxígeno disuelto; alteración del pH, de los niveles de conductividad y transparencia del agua (Buschmann, 2001)

La contaminación ambiental en cuerpos de agua que se ha presentado, obliga a buscar nuevas estrategias sustentables para solucionar la problemática. Con la finalidad de minimizar el impacto ambiental y contar con tecnologías económicamente rentables, se ha buscado el uso de distintos procesos de tratamiento.

Se han diseñado algunas plantas de tratamiento donde se ha evaluado la eficiencia en la depuración de agua residual acuícola de alevinos de trucha arcoíris y carpa común para apoyar comunidades con escasez de agua, donde, con sistemas semicerrados de tratamiento de agua residual acuícola para reúso, se establecen cultivos de peces adecuados (Gallego, Garcia, & Diaz, 2003). Además, diferentes estudios se han llevado a cabo con el fin de evaluar el potencial de reciclaje de estos desechos por parte de otros cultivos. Este modelo de acuicultura integrada fue inicialmente presentado por Folke & Kautsky (Folke, 1992) (Kautsky, 1997) El modelo describe un sistema de policultivos con componentes biológicos interactivos, como peces - moluscos, filtradores – y algas, y su relación con escurrimientos terrestres. Este modelo conceptual simple, coloca a la acuicultura dentro de una perspectiva ecológica, donde los desechos de uno de los componentes son utilizados como recurso

Cartagena y Malo presentaron en su proyecto de investigación una evaluación de la microalga *Chlorella vulgaris* en la remoción de materia orgánica de las aguas residuales tratadas por la PTAR El Salitre; haciendo énfasis en la remoción por la demanda química de oxígeno (DQO) y por los sólidos suspendidos totales (SST), los cuales son los parámetros en los que se basa la PTAR El Salitre para evaluar la remoción de materia orgánica en su proceso. También fue evaluada la incidencia de la microalga *Chlorella vulgaris* en otros parámetros fisicoquímicos como lo son: Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles (SV), Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV), pH, Turbiedad, Alcalinidad y Conductividad. La metodología que se llevó a cabo para la realización del proyecto consistió en la revisión bibliográfica para conocer las condiciones de un adecuado crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris*, posteriormente se realizó el cultivo de la misma obteniendo un volumen de 7 L de microalga aproximadamente. Luego se realizaron 2 pre-experimentaciones, la primera con el fin de conocer si la microalga en porcentajes de volumen de 33% y 50%, se adaptaba y crecía en el Agua Residual Tratada (ART) por la PTAR El Salitre; en la segunda se realizó un cultivo con microalga ya adaptada a éste nuevo sustrato y se evaluó el crecimiento de la microalga. Culminado el biotratamiento por medio de una centrifugación se separó la microalga y se analizaron los parámetros fisicoquímicos mencionados anteriormente al sobrenadante, donde se obtuvo una remoción de 81,80% por DQO y 89,91% por SST. (Cartagena Arevalo & Malo Malo, 2017)

Infante, presentó en su investigación el crecimiento de *Chlorella sp*, un alga microscópica, ampliamente distribuida en aguas marinas; los resultados de esta investigación resaltaron la robustez del cultivo de esta microalga a nivel de laboratorio, la cual se manifiesta en su reproducibilidad. El cultivo de *Chlorella sp*, se mantiene viable por un periodo de 15 días en las condiciones de este estudio, que es el tiempo máximo que se evalúa en el experimento de

biorremediación, con el fin de observar su comportamiento en cultivo. El diseño experimental contempló la obtención de la biomasa de la microalga, utilizando un medio preparado con sales inorgánicas. Se obtuvo información acerca de la reproducibilidad de los ensayos realizados, estableciendo que se trata de un microorganismo de fácil propagación. Este resultado a su vez posibilita la aplicación de la microalga a diferentes estrategias para la remoción de sustancias nocivas presentes en los ecosistemas. Este género ha sido aplicado al tratamiento biológico de aguas residuales, probando su efectividad en la remoción de nitrógeno, fósforo, demanda química de oxígeno y metales. El uso en aplicaciones de biorremediación ha sido bastante amplio, en forma suspendida o inmovilizada, como cepa pura o en asociación con otros microorganismos no fotosintéticos (Garza, Almaguer, Rivera, & Loredó, 2010). El cultivo por lotes resultó adecuado para la obtención de biomasa de *Chlorella sp* observándose un ajuste lineal para la cinética de crecimiento. (Infante C. , y otros, 2012)

Aguilar et al, presentó en su publicación “La contaminación del agua como una externalidad para la producción pesquera y acuícola”, un panorama general de la relación entre la contaminación del agua y las actividades pesqueras y acuícolas. En este trabajo la contaminación es considerada como un agente que genera un costo social que repercute en otras actividades, entre ellas la pesca y la acuicultura. La primera parte explica brevemente el concepto de externalidad en economía ambiental. En la segunda parte se describen los tres tipos principales de contaminación del agua: accidental, puntual y difusa, así como sus consecuencias en los ecosistemas y organismos acuáticos. Enseguida se trata el tema de los riesgos que tiene la contaminación en agua dulce (tercera parte) y lagunas costeras y mar (cuarta parte) sobre la pesca y la acuicultura en México, para pasar a la quinta parte en donde estos problemas se desarrollan con mayor detalle tomando como ejemplo la ostricultura en las lagunas del estado de Veracruz. La siguiente parte explica

brevemente los instrumentos de control de la contaminación del agua más frecuentemente utilizados y se explora su posible aplicación en México. La última parte habla de las perspectivas que tiene este campo de estudio, en cuanto a la necesidad de reforzar la investigación, la importancia de los monitoreos biológicos y de la valoración económica de los recursos acuáticos, así como el manejo integral de cuencas y zonas costeras. (Aguilar, Villanueva, & Guzmán, 2006)

En el capítulo 7 del libro: Agua potable para comunidades rurales, reúso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas; Gallego et al, expone un “Sistema de recirculación de agua para cría de alevín de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) y carpa común (*Cyprinus carpio*)”, donde se probó la eficiencia en la depuración de agua residual acuícola, en la etapa de alevín de los organismos acuáticos cultivados en este proyecto (trucha arcoíris y carpa común). Para la evaluación del sistema de tratamiento se analizaron los parámetros: DBO, DQO, NH₃, NO₂, NO₃, pH, temperatura, conductividad, sólidos, turbidez, cuenta en placa, Coliformes totales y fecales. En la evaluación de los cultivos se analizó el incremento de peso y longitud, así como, los parámetros: OD, pH, conductividad y temperatura, para cada una de los estanques. Los resultados encontrados para los parámetros analizados fueron: el oxígeno disuelto tiende a consumirse hasta llegar al filtro biológico donde se incrementa para luego disminuir hasta llegar a la lámpara ultravioleta donde se incrementa nuevamente el oxígeno, también, se observa una disminución de los sólidos disueltos y conductividad, sin embargo al pasar por el filtro biológico se vuelve aumentar la concentración de estos. La eficiencia del sistema en cuanto a la turbidez y los sólidos suspendidos fue de 98%, para la DBO₅ fue de 96.6% y para NH₃ de 71.4%. En conclusión se tiene que la planta de tratamiento ha probado ser eficiente en la depuración de agua residual acuícola, en la etapa de alevín de los organismos acuáticos cultivados en este proyecto (trucha arcoíris y carpa común) y el alcance de este proyecto se situó en el apoyo de las comunidades con escasez de agua,

donde, con sistemas semicerrados de tratamiento de agua residual acuícola para su reúso, les permitió establecer cultivos de peces con un éxito asegurado. (Gallego, Garcia, & Diaz, 2003)

Buschmann, en su publicación “Impacto ambiental de la acuicultura - El estado de la investigación en Chile y el mundo”, mostró un análisis bibliográfico de los avances y restricciones para una producción sustentable en los sistemas acuáticos. Basado en una revisión de los antecedentes publicados por diversos grupos de científicos establecidos en distintas regiones geográficas, así como en Chile, este estudio entregó algunas bases conceptuales y dimensionó la problemática ambiental relacionada con la acuicultura. Sigue con una discusión de aproximaciones metodológicas para determinar los efectos de esta actividad sobre ecosistemas acuáticos y posteriormente, entregó los antecedentes existentes sobre los efectos concretos que tiene esta actividad en el medio ambiente. Luego analizó la evidencia existente en Chile. Vistos los efectos medio ambientales, se indican aproximaciones metodológicas que han sido utilizadas para evaluar económicamente los impactos producidos por prácticas de acuicultura. Para finalizar, se presentan alternativas tecnológicas y estrategias de producción que tienden a minimizar los efectos ambientales y se entregan recomendaciones y conclusiones. Este informe aporta para nuestra investigación, los impactos que causa en el medio ambiente el desarrollo de la acuicultura. Principalmente, la alimentación de los salmones, la que interviene, tanto en la columna de agua como al fondo marino: a través del alimento no consumido que es altamente proteico y a través de los desechos de los peces. Las investigaciones que se recopilan en este estudio han detectado que este último fenómeno afecta aumentando la cantidad de nitrógeno y fósforo de los sistemas acuáticos, disminuyendo el oxígeno disponible, generando eutrofización, estimulando la aparición de algunos organismos y la ausencia de otros, y alterando gravemente los ecosistemas acuáticos, como sucede en la laguna Comagüeta. (Buschmann, 2001)

La investigación realizada por el autor en la Laguna Comagüeta evaluó el potencial de Biorremediación de materia orgánica, nitratos y fosfatos presentes en las aguas residuales de la Truchera ubicada en la Finca El Rincón, Chitagá, Norte de Santander Colombia utilizando microalgas, como una alternativa amigable con el ambiente como respuesta a la ausencia de conocimientos tecnológicos y un manejo ambiental inadecuado que ha causado pérdida del paisaje de la Laguna Comagüeta, lugar de descargue de estos aguas residuales, y por ende deterioro del ecosistema en general.

2.2 Bases conceptuales

Ambiente estéril: lugar físico el cual está libre de microorganismos a través de procedimientos físicos, químicos o mecánicos.

Autoclave: dispositivo de laboratorio destinado a la esterilización de material de laboratorio utilizando vapor a presión y temperaturas elevadas.

Biomasa: materia orgánica generada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.

Bioproceso: proceso industrial que involucra la manipulación de organismos vivos o sus componentes celulares para proveer bienes o servicios.

Biorremediación: se refiere al uso de seres vivos para restaurar ambientes contaminados en donde se utiliza plantas, algas, hongos o bacterias para absorber, degradar o transformar los contaminantes que pueden estar presentes en suelo, agua o aire.

Biotratamiento: bioproceso utilizado para el tratamiento de aguas residuales.

Cámara de Neubauer: instrumento utilizado para realizar recuentos celulares.

Centrifugación: método de separación de mezclas usado cuando la sedimentación es muy lenta,

en donde por acción de la fuerza centrífuga los componentes más pesados se sedimentan más rápidamente y los livianos quedan como sobrenadante.

Cepa: microorganismos definidos por lo menos a nivel de género y especie, depositados y mantenidos en una colección de cultivos.

Chlorella vulgaris: microalga unicelular perteneciente al reino protista de forma esférica de diámetro aproximado de 2 a 10 μ m de color verde presente en la mayoría de cuerpos de agua dulce.

Curva de crecimiento: representación gráfica que ilustra el número de células en un cultivo de microorganismos en el tiempo, en un medio determinado.

Digestión aerobia: tratamiento biológico para aguas residuales que consiste en la descomposición de materia orgánica mediante la utilización de oxígeno a partir de los microorganismos presentes en el agua residual.

Fertilizante foliar: sustancia utilizada como complemento a la fertilización del suelo cuando la nutrición proveniente de este es ineficiente.

Fotoperiodo: relación entre horas de luz y oscuridad a la que está sometido un microorganismo.

Fotorreactor: dispositivo destinado al cultivo masivo de microalgas. Tienen que mantener un medio estable (temperatura, pH, baja concentración de O₂) y proporcionar los nutrientes necesarios para el crecimiento incluyendo la luz.

Fotosíntesis: proceso en el cual un microorganismo con clorofila captura la energía en forma de luz y la transforma en energía química.

Inóculo: suspensión de microorganismos vivos adaptados para reproducirse en un medio específico.

Medio de cultivo: mezcla de nutrientes que en concentraciones adecuadas y condiciones físicas óptimas permiten el crecimiento de los microorganismos.

Sustrato: es la base, materia o sustancia que sirve de sostén a un organismo, ya sea vegetal,

animal o protista, en el cual transcurre su vida; el sustrato satisface determinadas necesidades básicas de los organismos como la fijación, la nutrición, la protección, la reserva de agua, etc.

2.3 Marco teórico

2.3.1 La industria acuícola.

La acuicultura es la cría de organismos acuáticos, comprendiendo entre estos: peces, moluscos, crustáceos y plantas. La cría supone la intervención humana para incrementar la producción, por ejemplo: concentrar poblaciones de peces, alimentarlos o protegerlos de los depredadores; supone asimismo tener la propiedad de las poblaciones de peces que se estén cultivando. La acuicultura varía mucho según el lugar donde se lleve a cabo, desde la piscicultura de agua dulce en los arrozales de Vietnam hasta la cría de camarón en estanques de agua salada en las costas de Ecuador, y la producción de salmón en jaulas en las costas de Noruega o de Escocia. Sin embargo, la mayor parte de la acuicultura se lleva a cabo en el mundo en desarrollo, para la producción de especies de peces de agua dulce de poco consumo en la cadena alimentaria, como la tilapia o la carpa. (FAO/OSPESCA., 2002)

2.3.1.1. Visión general del sector acuícola en Colombia. (FAO, 2005)

Colombia es un país tropical con temperaturas estables, posee todos los pisos térmicos y una vasta red fluvial que recorre todo el país. Tiene una superficie continental de 1 441 748 km² y posee costas sobre el océano Pacífico (1300 km) y el océano Atlántico (1600 km). Tiene una gran cantidad de cuencas hidrográficas que lo posicionan en un lugar destacado en recursos hídricos en

el mundo. Posee una de las mayores diversidades de peces del planeta y una alta biodiversidad de organismos hidrobiológicos, al igual que aguas dulces, salobres y marinas y terrenos aptos que le otorgan un gran potencial para el desarrollo de la acuicultura.

La acuicultura tiene un buen ritmo de crecimiento, con una rentabilidad mayor que las actividades agropecuarias tradicionales. Pero en los últimos años se ha disminuido por la estabilidad de los precios de venta del producto, frente al aumento del costo de los insumos, especialmente los alimentos concentrados; esto está contribuyendo a sustituir parte de la disminución de la oferta natural del recurso pesquero continental por sobrepesca, factores ambientales y degradación del hábitat, entre otros factores. Cuenta con políticas e instrumentos gubernamentales para su desarrollo, con entes estatales y privados que la apoyan y la promueven, desarrollando programas de investigación, administración, ordenamiento y fomento en forma permanente.

2.3.1.2 Historia y visión general. (FAO, 2005)

La acuicultura de agua dulce data de finales de los años 30 con la introducción de la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) con fines de repoblamiento en aguas de uso público para la pesca deportiva. Se inicia en los años 70 en aguas salobres y marinas con las investigaciones sobre la biología y el cultivo de la ostra de mangle (*Crassostreaa rhizophorae*). Continúa en los años 80 con el cultivo de camarón patiblanco (*Penaeus vannamei*) en el Pacífico y en el Atlántico colombiano con fines de exportación (INPA, 2002), a través del apoyo de la misión China al país por intermedio del INDERENA (INPA, 1995). A finales de la década de los 90 e inicios del 2000, se comienzan las investigaciones con la adaptación al cautiverio y la reproducción del pargo

lunarejo (*Lutjanus guttatus*) en el Pacífico y posteriormente con la reproducción del Pargo palmero (*Lutjanus analis*) en el Caribe y la reproducción y el cultivo de los pectínidos (*Argopecten sp* y *Nodipecten sp*) también en el Caribe.

Los sistemas de producción acuícolas son básicamente cultivos en estanques en tierra y jaulas flotantes para las especies de clima cálido como la tilapia roja (*Oreochromis sp*), en estanques en tierra para la cachama blanca (*Piaractus brachypomus*) y el camarón patiblanco (*Penaeus vannamei*). Para clima frío (truchas), se emplean estanques en tierra, recubiertos con geomembrana o construidos en cemento y también jaulas flotantes. Existen generalmente cultivos semi-intensivos e intensivos con recambios de agua, uso de aireadores y en ocasiones oxígeno líquido.

Los principales hitos en el desarrollo de la acuicultura en Colombia lo constituyen el apoyo de las Agencias y Organismos Internacionales como FAO, AID, BID, JICA, ACCI y KOICA entre otras, al desarrollo de la acuicultura en el país. La introducción de especies exóticas con tecnología desarrollada de otros países, está representada por trucha, carpas y tilapias; por otra parte la reproducción de las especies nativas está dada por el bocachico (*Prochilodus magdalenae*), el bagre (*Pseudoplatistoma fasciatum*), las cachamas blanca y negra (*Piaractus brachypomus* y *Colossoma macropomum*) y el yamú (*Brycon siebenthalae*) entre las más importantes, para los programas de repoblamiento, fomento, seguridad alimentaria y producción industrial. En los años 80 fue representativo el desarrollo de la camaronicultura con fines de exportación; en los 90 el desarrollo de la tecnología de cultivo de la tilapia roja en jaulas flotantes y en los últimos años la reproducción de los pargos lunarejo (*Lutjanus guttatus*) en el pacífico y el palmero (*Lutjanus analis*) en el Atlántico; de igual manera el cultivo de la ostra (*Crassostrea rhizophorae*) y la reproducción y el

cultivo de los pectínidos (*Argopecten sp* y *Nodipecten sp*).

A nivel Institucional la acuicultura se estableció con la creación del Instituto Nacional de los Recursos Renovables y del Ambiente - INDERENA (1968 - 2003) quien manejó la pesca y la acuicultura en ese periodo, que de allí se originó el Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura (INPA) (1991 - 2003) el cual que se fusionó con otras entidades del sector agropecuario, para crear el Instituto Nacional de Desarrollo Rural (INCODER). Los profesionales y técnicos dedicados a la acuicultura han evolucionado pasando a ocupar cargos de responsabilidad a nivel nacional en Ministerios, Institutos Nacionales, Corporaciones Autónomas Regionales, Universidades, centros de investigación o en sus propias empresas en Colombia o en el exterior. Se ha incrementado el número, los conocimientos y las experiencias en el interior del país y en el exterior.

2.3.2 La Trucha – Introducción.

La trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) perteneciente a la familia Salmonidae, es un pez originario de ríos tributarios del río Sacramento en California, Norteamérica y fue introducido en Colombia en 1939, para repoblamiento y aprovechamiento de ríos de aguas frías, en zonas de temperaturas entre 10 y 18°C (Núñez & Somoza, 2010). Desde allí hasta la fecha, en el país ha aumentado el número de granjas dedicadas a la truchicultura, debido a la gran demanda existente por la delicadeza de su carne. Actualmente las ovas se están importando de Estados Unidos, con los permisos correspondientes. Ese es el origen de la mayoría de los alevines que utiliza la industria en el país, ya que tienen crecimientos más rápidos y que se les está tratando de mejorar genéticamente. (Betancur, Rivera, Echeverri, Trujillo, & Taborda, 2010)

Por presentar excelentes características para su producción en cautiverio, ha sido ampliamente distribuida en los cuerpos de aguas frías de muchos países del mundo. En Colombia la producción de trucha arcoíris se ha convertido en el tercer grupo de peces más cultivado, después de las tilapias y las cachamas (Quintero, Pardo, & Quintero, 2011); esta actividad se desarrolla en gran medida en los departamentos de Antioquia, Cundinamarca, Tolima, Huila, Santander, Norte de Santander, Boyacá, Cauca, Nariño y Quindío; con liderazgo de Cundinamarca en la importación de ovas para la producción de semillas.

La producción de trucha tuvo sus mayores reportes a finales de los años noventa (FAO, 2009), sin embargo, es una de las actividades económicas relacionadas con la producción de productos alimenticios de origen animal que continua creciendo rápidamente en comparación de otras actividades pecuarias (Núñez & Somoza, 2010)

2.3.2.1 Generalidades de la trucha.

El cuerpo de la trucha arcoíris se caracteriza por tener forma fusiforme y presentar bandas iridiscentes en los flancos, de los cuales toma su nombre. El dorso es de color oscuro y vientre claro, presenta puntos negros y está recubierta por finas escamas y la coloración varía de acuerdo a la edad y sexo, habita en aguas de bajas temperaturas, requiriéndose de 9 -12° C para la producción de alevinos y de 12-18° C para engorde. En Colombia la especie se adapta muy bien y el cultivo se realiza en zonas que están por encima de los 2.000 msnm. (Quintero, Pardo, & Quintero, 2011)

Según la Dirección Nacional de Recursos Acuáticos, (DINARA), el éxito del cultivo de la trucha depende de varios factores como son la cantidad y calidad del agua, la densidad de siembra, la uniformidad en los tamaños, el manejo y la alimentación (DINARA, 2010). La cantidad y la calidad del agua son los factores más importantes a tener en cuenta para el cultivo de la trucha, necesiándose un nivel de oxígeno superior a 7.0 ppm en la entrada de los tanques y no inferior a 5.0 ppm en la descarga; el pH debe estar entre 7 y 8.5 y la temperatura óptima para el engorde es de 15° C (Corral, Grizel, Montes, & Polanco, 2000). Para su cultivo se pueden utilizar estanques en tierra (recubiertos con geomembrana, preferiblemente), en piedra o en concreto y jaulas. Es conveniente tener estanques de dos tamaños: pequeños para la etapa de alevinaje y más grandes para el engorde.

2.3.2.2 Etapas del cultivo.

El desarrollo biológico de la trucha comprende 4 etapas en el sistema de producción:

a. Ova: Son los huevos fecundados que después de un promedio aproximado de 30 días de incubación, eclosionan para convertirse en larva. inmediatamente después de la eclosión, los alevinos son delicados y necesitan reposo. Esta fase puede durar entre 15 a 30 días, dependiendo de la temperatura del agua. En este estadio se puede observar a presencia del saco vitelino, el cual provee reservas nutritivas a su alimentación hasta que su desarrollo fisiológico les permita recibir alimento exógeno. En este nivel ya se encuentran en condiciones de nadar libremente. Es recomendable iniciar el suministro alimenticio cuando el pez haya absorbido casi el 80% de su saco vitelino. Se empleara alimento balanceado en polvillo, esparciendo lentamente sobre la artesa, con una frecuencia de 10 -12 veces por día. (FAO, 2014)

b. Alevinaje: Este proceso va desde los 2 cm hasta los 7 - 9 cm de longitud de los peces, utilizándose piletas de cemento o fibras de vidrio, circulares o rectangulares. La biomasa a mantener es de 7- 8 kg/m³ máximo, según el tamaño de los alevinos (Jover, Martínez, & Tomás, 2003). En esta etapa se requieren entre 5 y 70 l/min de agua para 10.000 alevinos cantidad que depende del tamaño de los peces, la densidad de siembra utilizada y la temperatura. El alimento debe contener 50 % de proteína y ser suministrado en una proporción diaria del 6% de la biomasa al principio y 4% al final, repartido en 12 comidas por día (Morales, 2004). Se deben seleccionar los peces por tamaños con el fin de evitar el canibalismo y altos porcentajes de cabezas y colas. La manipulación de alevinos tiene que hacerse antes de alimentar y sin radiación solar fuerte.

c. Levante: se inicia con alevinos de 12 g y finaliza a los 3-4 meses de cultivo con peces de 100gr.; para esta fase se utilizan estanques en concreto de forma rectangular de 12-24 m de largo por 1-2 m ancho y 0,8 a 1 m de columna de agua al aire libre. La densidad inicial de siembra es 50 truchas de 12g/m³ (7,8 Kg/ m³) para al final del levante disminuir a 150 truchas de 100g/ m³ (15 Kg/ m³) (Quintero, Pardo, & Quintero, 2011)

d. Engorde: se inicia cuando los alevinos tienen 7-9 cm y finaliza cuando alcanzan talla comercial, con pesos entre los 200-500 gr, en un tiempo entre 7 y 15 meses dependiendo de la calidad de la semilla, la temperatura del agua, la densidad de siembra y la alimentación (Corral, Grizel, Montes, & Polanco, 2000). Esta etapa puede realizarse en estanques (rectangulares o circulares) o en jaulas. Los tanques rectangulares tienen la ventaja que ocupan menos espacio, pero son menos eficientes, especialmente en lo relacionado con el aseo, pues es necesario limpiarlos adecuada y periódicamente para eliminar los sedimentos y restos de alimento; los tanques circulares ocupan mayor espacio pero son más eficientes por cuantos se auto limpian. Los

estanques construidos en concreto son más costosos que los de tierra, pero ofrecen mayores ventajas, como son una vida útil larga, bajos gastos de mantenimiento, resistencia a los grandes flujos de agua, mejores condiciones sanitarias, fácil manejo y mayor capacidad de carga (Morales, 2004). Las jaulas se emplean en lagos, lagunas, embalse o grandes reservorios, con buena calidad de agua y profundidad mayores 3-4 m. En el engorde de truchas es indispensable la toma de los parámetros físico-químicos del agua en los estanques, principalmente oxígeno disuelto, temperatura y pH, de tal manera que se mantenga en los rangos adecuados para garantizar el buen estado de los peces y un desarrollo óptimo el cultivo (Larenas, Contreras, Oyanedel, Morales, & Smith, 1998)

Puesto que las truchas son muy exigentes en la calidad del agua, la misma debe ser filtrada con el fin de evitar que llegue cualquier tipo de material que pueda afectar el cultivo. La cantidad de agua necesaria depende de la producción esperada, calculándose que en engorde se requiere entre 14 y 16 lt/seg por tonelada; el recambio de agua en los tanques debe ser como mínimo el suficiente para que en cada uno se renueve el agua completamente cada hora. Adecuados sistemas de manejo, limpieza, alimentación y selección por tallas contribuirán a obtener mejores resultados (Jover, Martínez, & Tomás, 2003)

La temperatura en la que se realiza el cultivo influye directamente en el crecimiento de las truchas, presentándose diferencias muy notorias ante pequeños cambios de este parámetro. En Colombia, la temperatura óptima para el cultivo de esta especie es 15°C. (Corral, Grizel, Montes, & Polanco, 2000)

2.3.2.3 Distribución y características de los sistemas de cultivo.

Los principales departamentos en donde se produce son Antioquia, Boyacá y Cundinamarca, y representaron el 78 por ciento de la producción en el año 1999. Actualmente se ha extendido a Cauca, Huila, Nariño, Santander, Norte de Santander y Quindío entre otros. Los cultivos se realizan en estanques en tierra o recubiertos con geo membrana o revestidos en concreto. El agua generalmente viene por gravedad en grandes volúmenes y con altos recambios. Se utilizan alimentos concentrados del 48 por ciento para iniciación y del 45 por ciento de proteínas con o sin pigmento y no se utilizan fertilizantes. La densidad utilizada es de 60 peces/m³ equivalente a una carga de 0.18 - 0.24 kg/m³ y el rendimiento de la producción se estima en alrededor de 300 kg/m³ /año. También se realizan cultivos en jaulas flotantes en lagos naturales y represas de aguas frías.

2.3.2.4 Sistemas de cultivo.

Los principales sistemas de cultivo son los semiintensivos a nivel de los pequeños productores, con la utilización de fertilizantes orgánicos o inorgánicos y con el suministro de alimentos concentrados comerciales y el uso de productos de la finca para la alimentación de los peces. Y los sistemas intensivos y superintensivos que son practicados por los productores industriales, en estanques en tierra o en balsas jaulas y con el empleo único de alimento concentrado. En los últimos años se han implementado sistemas de recambios de agua, aireación artificial con aireadores de hélice o de paletas, empleo de blowers, que suministran aireación y en el caso de algunos cultivos de trucha la utilización de oxígeno líquido para incrementar los rendimientos por unidad de área.

Para su cultivo se pueden utilizar estanques en tierra (recubiertos con geo membrana, preferiblemente), en piedra o en concreto y jaulas. Es conveniente tener estanques de dos tamaños: pequeños para la etapa de alevinaje y más grandes para el engorde. (Figura 1)



Figura 1. Estanques de crecimiento. Fuente: Autor. Técnica digital. Finca El Rincón.

Vereda Presidente.

2.3.2.5 Contribución a la economía.

Con respecto a la seguridad alimentaria, la acuicultura viene repuntando desde 1985, al ir sustituyendo la producción pesquera de aguas continentales. En cuanto a las poblaciones rurales, éstas han construido pequeños estanques como parte de la acuicultura rural de pequeña escala tipo I y II, para contribuir a su alimentación. Así se crían peces, pollos, gallinas, patos y cerdos etc., con fines de autoconsumo y generación de ingresos cuando se venden los excedentes de la producción. (FAO/OSPESCA., 2002)

En cuanto al desarrollo económico, se ha generado empleo rural y productos para la exportación generando divisas para el país y manteniendo la oferta interna para el consumo nacional. En cuanto

al uso de recursos, los campesinos disponen de fincas de 5 - 10 ha promedio y dependiendo de la zona en la que se encuentren, disponen de fuentes de agua. Muchos de ellos han construido estanques para piscicultura de subsistencia. Su interacción con el ambiente no es muy nociva, ya que utilizan pequeñas áreas desprovistas de bosques naturales y en ocasiones se construyen los pequeños estanques sobre terrenos pantanosos o áreas marginales de sus fincas. El problema ambiental puede surgir al permitir escapes de las especies al medio natural y el aporte de materia orgánica al medio acuático cuando se realizan las cosechas y se desocupan los estanques.

En cuanto a la superación de la pobreza, la acuicultura ha contribuido a reducir los gastos de la población rural por la producción de pescado en sus fincas. Esta posibilidad acuícola los lleva a ahorrar parcialmente el dinero que invertían en la compra de la carne de bovino. En las fincas de los hogares más pobres se construyen pequeños estanques con apoyo de programas estatales, donde se recibe capacitación y en ocasiones semillas para iniciar los cultivos. Así estas familias incrementan levemente sus ingresos y realizan autoconsumo de su producción.

2.3.3 Efectos ambientales del desarrollo de la acuicultura.

Aunque generalmente se eligen para la acuicultura lugares que no se usan directamente para otros fines productivos, puede haber otros usos indirectos competidores en dichas áreas y a veces usos directos alternativos. Además las prácticas de la acuicultura pueden estar en pugna con la agricultura, la pesca deportiva y otras pescas de captura, la expansión industrial, la navegación, el desarrollo de los recursos acuáticos, el desarrollo residencial y de zonas de recreo. En algunas circunstancias se puede argumentar también que la belleza del área puede quedar gravemente dañada. Los mayores problemas pueden ser causados por descargas excesivas de residuos

orgánicos que pueden contener sustancias tóxicas en aguas cuerpos de agua no contaminados. La sobrecarga de nutrientes puede causar una floración de algas, una disminución de oxígeno, una turbiedad creciente y otros cambios en la calidad del agua.

La acuicultura intensiva puede causar alguna polución orgánica como resultado de la acumulación de subproductos metabólicos de las especies cultivadas y la demanda biológica de oxígeno causada por el alimento no utilizado, especialmente en ambientes donde el intercambio del agua es lento y el proceso de mezcla reducido.

Todos los sistemas de producción piscícola generan desperdicios (constituidos por material sólido, alimento no consumido, heces y materiales solubles como fósforo y nitrógeno) y productos de excreción (de los peces en cultivo), en especial cuando se usan grandes raciones para la alimentación, agudizándose con el aumento de la biomasa que demanda más alimento. (Sagratzki, Pereira-Filho, Bordinhon, & Fonseca, 2004)

Una acuicultura bien planificada incluirá medidas para la biodegradación de sus propios residuos. Cuando se utilizan para la acuicultura extensiones abiertas de agua, como en el caso de los cultivos en jaula o cercas, se dará la debida atención a sus posibles efectos sobre el flujo del agua, sedimentación, acumulación de residuos, etc., y se tomarán las medidas necesarias para prevenir la deterioración del ambiente. (Gelineau, Medale, & Boujard, 1998)

2.3.4 Desarrollo sostenible.

Los seres humanos hacen uso indiscriminado de los recursos naturales con claros límites en su

capacidad de renovación. Esto, junto a una sociedad que valora el consumo y la acumulación de capital, mantiene un rumbo que promete consecuencias desastrosas. La sobrepoblación y la occidentalización de la sociedad generan, por un lado, presión sobre ecosistemas y cambio climático y, por otro, inequidad y pobreza. Si bien los problemas no son nuevos, hace ya algunos años se superó la capacidad de carga del planeta, es decir, el tamaño máximo de población que el medioambiente puede sostener indefinidamente, dada la disponibilidad de alimento, hábitat, agua y otros recursos. (Echarri, 1998)

En la actualidad, existen diversos problemas ambientales, muchos de ellos se relacionan con el grave deterioro de las condiciones naturales, que pone en peligro el mantenimiento de toda la vida en el planeta. Con el transcurso del tiempo, cada vez se va tomando más conciencia de que, si bien las transformaciones que se realizan en la naturaleza tienen por objetivo mejorar las condiciones de vida de la población, muchas veces también traen efectos negativos no deseados.

Un sistema económico basado en la máxima producción, el consumo, la explotación ilimitada de recursos y el beneficio como único criterio de la buena marcha económica es insostenible. Un planeta limitado no puede suministrar indefinidamente los recursos que esta explotación exigiría. Por esto se ha impuesto la idea de que hay que ir a un desarrollo real, que permita la mejora de las condiciones de vida, pero compatible con una explotación racional del planeta que cuide el ambiente, es el llamado desarrollo sostenible.

La más conocida definición de Desarrollo Sostenible es la de la Comisión Mundial sobre Ambiente y Desarrollo (Comisión Brundtland) que en 1987 definió Desarrollo Sostenible como: "es el desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la

capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades". Según este planteamiento el desarrollo sostenible tiene que conseguir a la vez:

- ✓ Satisfacer a las necesidades del presente, fomentando una actividad económica que suministre los bienes necesarios a toda la población mundial. La Comisión resaltó "las necesidades básicas de los pobres del mundo, a los que se debe dar una atención prioritaria".
- ✓ Satisfacer a las necesidades del futuro, reduciendo al mínimo los efectos negativos de la actividad económica, tanto en el consumo de recursos como en la generación de residuos, de tal forma que sean soportables por las próximas generaciones. Cuando nuestra actuación supone costos futuros inevitables, se deben buscar formas de compensar totalmente el efecto negativo que se está produciendo. (Echarri, 1998)

Las características que debe reunir un desarrollo para que se pueda considerar sostenible son: busca la manera de que la actividad económica mantenga o mejore el sistema ambiental, asegura que la actividad económica mejore la calidad de vida de todos no de unos pocos, usa los recursos eficientemente, promueve el máximo de reciclaje y reutilización, pone la confianza en el desarrollo e implantación de tecnologías limpias, restaura los ecosistemas dañados, promueve la autosuficiencia regional, reconoce la importancia de la naturaleza para el bienestar humano .

Para conseguir un desarrollo sostenible debe haber un cambio en la manera de pensar. La mentalidad humana está firmemente asentada en una visión de las relaciones entre el ser humano y la naturaleza que lleva a pensar que los hombres civilizados están fuera de la naturaleza y que no afectan sus leyes; el éxito de la humanidad se basa en el control y el dominio de la naturaleza; la Tierra tiene una ilimitada cantidad de recursos a disposición de los humanos.

Estos planteamientos se encuentran firmemente asentados en el hombre, especialmente en la cultura occidental que desde hace unos cuatro siglos, ha visto el éxito de una forma de pensar técnica y centrada en el dominio de la naturaleza por el hombre. El punto de vista del desarrollo sostenible pone el énfasis en que se deben plantear nuestras actividades dentro de un sistema natural que tiene sus leyes. Se deben usar los recursos sin trastocar los mecanismos básicos del funcionamiento de la naturaleza.

Un cambio de mentalidad es lento y difícil. Requiere afianzar unos nuevos valores y para hacerlo son de especial importancia los programas educativos y divulgativos. Tiene mucho interés dar a conocer ejemplos de actuaciones sostenibles, promover declaraciones públicas y compromisos políticos, y desarrollar programas que se propongan fomentar este tipo de desarrollo (Echarri, 1998)

El desarrollo sostenible en la industria piscícola contempla la ordenación y la conservación de los recursos naturales, como las poblaciones de peces, de tal forma que se satisfagan las necesidades humanas hoy a la vez que se asegure la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras. En los sectores agrícolas, forestal y pesquero, el desarrollo sostenible se propone conservar las tierras, el agua, los recursos fitogenéticos y zoogenéticos, sin degradar el medio ambiente, mediante una tecnología apropiada y con medios económicamente viables y aceptables para la sociedad de las comunidades interesadas. (FAO/OSPESCA., 2002)

2.3.5 Competitividad.

La competitividad es la capacidad que tiene una empresa, sector o espacio para vender sus

productos en un mercado abierto. Esta capacidad está relacionada con la existencia de ventajas competitivas frente a otras empresas, sectores o territorios. A su vez, el desarrollo de ventajas competitivas depende de la adquisición de competencias o habilidades por parte de los individuos u organizaciones. (Galindo, 2008)

La competitividad depende de la relación entre el valor y la cantidad del producto ofrecido y los insumos necesarios para obtenerlo y la productividad de los otros oferentes del mercado. Por ejemplo, una empresa será muy competitiva si es capaz de obtener una rentabilidad elevada debido a que utiliza técnicas de producción más eficientes que las de sus competidores, que le permiten obtener ya sea más cantidad y/o calidad de productos o servicios, o tener costos de producción menores por unidad de producto.

Una estrategia sostenible y competitiva para que la acuicultura pueda ser eficiente como proceso de producción debe: reconocer el hecho de que los acuicultores obtengan una recompensa justa de su actividad, garantizar una distribución equitativa de los beneficios y los costos, promover la creación de riqueza y empleo, asegurar que hay suficientes alimentos disponibles para todos, gestionar el medio ambiente en beneficio de las generaciones futuras, asegurar un desarrollo ordenado de la acuicultura, así como una buena organización por parte de las autoridades y la industria.

La máxima aspiración de la acuicultura es desarrollar todo su potencial de forma que las comunidades prosperen y las personas estén más sanas, haya más oportunidades para mejorar los medios de vida, con un aumento de los ingresos y una mejor nutrición; y que los agricultores y las mujeres se vean empoderados.

2.3.6 Aguas residuales.

El agua residual se puede definir como la combinación de los residuos o desechos, los cuales provienen o son procedentes tanto de instituciones públicas, establecimientos industriales, comerciales y residencias a lo que se les puede agregar eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales. (Romero Rojas, 2004)

Las técnicas habituales de cultivo de peces, pueden generar impactos negativos sobre el medio ambiente, en especial hay que considerar los asociados a las descargas de sus efluentes caracterizados por ser ricos en materia orgánica, nutrientes y sólidos en suspensión que pueden alterar las propiedades físicas, químicas y biológicas de los cuerpos de agua, y por lo tanto las poblaciones de organismos acuáticos. Ante lo mencionado en otros países se han estudiado y desarrollado diferentes alternativas de tratamiento como son los sistemas de filtración, sedimentación, humedales, digestión anaerobia, entre otras. En el caso de Colombia, el tema empieza a cobrar importancia.

Los efluentes piscícolas pueden contener una gran variedad de constituyentes, material orgánico e inorgánico, nutrientes, tanto en forma particulada como disuelta, que al ser liberados al ambiente puede causar alteraciones negativas. El impacto asociado a esta actividad depende de las características contaminantes del efluente así como de la capacidad de asimilación de los ecosistemas. El agua que sale del estanque (efluente) al ser vertida a un cuerpo de agua natural puede generar alteraciones como disminución en la concentración de Oxígeno Disuelto (OD), aumento en la concentración de sólidos en suspensión (SST), aumento en la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), aumento en la Demanda Química de Oxígeno (DQO), formas de Nitrógeno y

Fósforo (Pardo, Suárez, & Soriano, 2006).

La presencia de sólidos en suspensión genera desequilibrios en los ecosistemas acuáticos, interfiriendo en la capacidad de penetración lumínica que se ve reflejada en la disminución de las tasas de producción primaria alterando las cadenas tróficas. Cobra importancia además, por el aporte de Carbono orgánico y nutrientes como el Fósforo y el Nitrógeno. Según Weston, el aporte de compuestos orgánicos ocasiona cambios en las comunidades bentónicas de las zonas aledañas al cultivo. Por su parte la introducción de nitratos y fosfatos en el medio acuático es de particular preocupación, ya que promueven el crecimiento de algas que a su vez producirá alteraciones en parámetros como pH y oxígeno disuelto. (Weston, 1990) Además de lo anterior, la materia orgánica presente en el agua es destruida por organismos descomponedores (bacterias), que demandan oxígeno para actuar iniciando así un proceso de competencia por oxígeno con las especies ícticas, hasta crear ambientes anaeróbicos dando lugar a putrefacciones acompañadas de malos olores, aumentando los parámetros de DBO, DQO y disminuyendo la profundidad de los cuerpos de agua por acumulación de sedimentos. (Cripps, 2000) (Gál, 2003)

2.3.7.1 Tratamiento de aguas residuales.

Consiste en una serie de procesos químicos, biológicos y físicos que tienen como finalidad eliminar contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua efluente del uso humano. (Ramalho, 2003)

Según lo reportado por True, en las granjas piscícolas existen dos tipos de efluentes: el primero de bajas concentraciones y altos flujos, y el segundo de menor flujo y mayor concentración de

contaminantes. En este mismo sentido se han orientado sus tratamientos. Se han desarrollado varios tipos de filtración mecánica y su uso se ha orientado tanto para la eliminación de partículas sólidas como para la concentración del efluente, algunos ejemplos de esta tecnología son los filtros de pantallas, filtros de bolsa y de cartucho, filtros de medios porosos y granulares, y filtros de bolas (True, Johnson, & Chen, 2004). Comparativamente todos tienen ventajas y desventajas cuando se consideran pérdidas de carga, carreras de filtración, tasas de filtración y facilidad de limpieza a contracorriente. García y Luna, evaluaron un Filtro en grava de Flujo Ascendente en el tratamiento de efluentes de operación normal del cultivo de Tilapia roja, encontrando remociones para SST (57%), PT (54%), NT (41%), DBO₅ (21%), DQO (25%), así como reducciones de Coliformes fecales (0,97 Unidades log) a una velocidad de filtración de 0,6 m/h (García Galindo & Luna Imbacuan, 2009). Otros autores reportan el uso de tanques de sedimentación, lo cual es muy común para buscar el espesamiento de los efluentes del lavado de estanques. Una vez la carga de sólidos abandona los dispositivos de espesamiento, ésta es dispuesta en tierra para su infiltración o usada para compostaje y vermicompostaje. (Sharrer, 2007)

El tratamiento de aguas residuales se realiza por etapas donde el número de fases depende del tipo de agua residual y los costos que se generen. El tratamiento de agua normalmente se divide en tratamiento primario, secundario, terciario y antes de ello se realiza un tratamiento preliminar en los cuales se realiza la depuración de contaminantes específicos. Este proceso se describe a continuación:

Tratamiento preliminar: Se hacen como antecedentes a los tratamientos primarios, secundarios o terciarios, debido a que las aguas residuales pueden venir con desechos muy grandes y voluminosos que no pueden entrar a la planta de tratamiento y cuando se eliminan aumentan la

efectividad de estos procesos. Para ello se utilizan rejillas, tamices y micro filtros.

- ✓ *Rejillas*: con estas se retiene todo el material grueso, su principal objetivo es retener basuras grandes debido a que el material sólido grueso puede afectar el funcionamiento de las bombas, válvulas, aireadores, etc. Se construyen con barras de diferente distancia entre barrotes y es el primer filtro para retención de basuras.
- ✓ *Tamices*: Su objetivo es remover un porcentaje de sólidos de menor tamaño con el fin de evitar taponamiento de tuberías, filtros biológicos. Tienen una inclinación la cual permite que circule el agua y del mismo modo deslizar los desechos por fuera de la malla.
- ✓ *Micro filtros*: son planillas giratorias plásticas o de acero, cuyo objetivo es recoger los desechos y las basuras en su interior, estos poseen un sistema de lavado que permite mantener las mallas limpias. (Ramalho, 2003)

Tratamiento primario: Tiene como fin eliminar los sólidos en suspensión a partir de procesos de sedimentación simple por gravedad o asistida por coagulantes y floculantes. Para aumentar la eficiencia de este proceso se agregan compuestos químicos como sales de hierro, aluminio, cloruro férrico y polielectrolitos floculantes, para precipitar el fósforo, los sólidos en suspensión muy finos o aquellos en estado de coloide. Este proceso se realiza en tanques de sedimentación primarios o clarificadores primarios con una profundidad que oscila entre 2 a 5 m. Diseñados para suprimir aquellas partículas con tasas de sedimentación de 0.3 a 0.7 mm/s. Esto se hace en un proceso de retención corto de 1 a 2 horas. En esta etapa se elimina por precipitación del 60% al 70% de los sólidos en suspensión. Normalmente las plantas trabajan varios sedimentadores primarios, donde su forma puede ser circular, cuadrada o rectangular.

Tratamiento secundario: Su función es eliminar la materia orgánica en disolución y en estado coloidal por medio de un proceso de oxidación biológica seguido por uno de sedimentación. Este proceso es natural controlado, en donde participan microorganismos presentes en el agua residual. Estos microorganismos que en su mayoría son bacterias se alimentan de los sólidos en suspensión y en estado coloidal produciendo en su degradación una biomasa bacteriana que precipita en el decantador secundario. De esta manera el agua queda limpia, pero con unos lodos los cuales deben ser eliminados. Las estructuras usadas para este tratamiento son filtros de arena intermitentes, percoladores, contadores biológicos rotarios, lechos fluidizados, tanques de lodos activos y sistema de digestión de lodos.

Tratamiento terciario: Tiene como fin depurar algunos contaminantes específicos en el agua residual como lo son los fosfatos que provienen del uso de detergentes domésticos e industriales, metales pesados y elementos tóxicos presentes en el agua. No todas las plantas tienen esta etapa, dependerá de la composición del agua residual y del destino que se le dará. (Ramalho, 2003)

2.3.7.2 Biorremediación.

Es una tecnología emergente en la cual se utilizan organismos vivos como plantas, hongos, bacterias y microalgas para absorber, degradar o transformar los contaminantes y retirarlos, inactivarlos o mitigar su efecto en el suelo, agua y aire. La Biorremediación de aguas residuales con microorganismos consiste en un tratamiento secundario de una planta de tratamiento de aguas residuales donde se utilizan los microorganismos para eliminar la materia orgánica del agua, siendo esta su fuente de alimento que al ser digerida desprenden dióxido de carbono y metano. Esta digestión puede hacerse de forma aerobia o anaerobia. (Garbisu, Amezaga, & Alkorta, 2003)

El tratamiento de las aguas residuales en la que se usan macroalgas y microalgas para la remoción o biotransformación de contaminantes se conoce como *Ficorremediación*, entre los contaminantes están incluidos nutrientes y xenobióticos de las aguas residuales y CO₂ de los residuos en el aire (Olgúin, 2003). El cultivo de microalgas a nivel general trae muchos beneficios entre los cuales se destacan: tratamiento aguas residuales, producción de alimento para animales, producción de fertilizantes y producción de químicos. Las microalgas usadas en el tratamiento de aguas residuales tienen la ventaja adicional que no produce contaminantes ya que la biomasa producto del proceso, permite el reciclaje eficiente de los nutrientes (González Rosa, Cañizares, & Baena, 1997). La ficorremediación promete diversas aplicaciones tales como: Remoción de nutrientes de aguas residuales con altos contenidos de materia orgánica; Tratamiento de aguas residuales ácidas y con metales; Retención CO₂; Transformación y degradación de xenobióticos. (Olgúin, 2003)

2.3.8 Microalgas.

Las microalgas son un gran grupo compuesto por protistas fotoautótrofos eucarióticos y cianobacterias procariontas. Representan una parte importante de un grupo llamado fitoplancton. Las microalgas presentan una variedad de tamaños, estructuras y formas. (Corrêa, Drews-Jr, Silva da Costa Botelho, & Silva de Souza, 2017). Son microorganismos que pertenecen al reino protista, que es aquel en el cuál se agrupan todos aquellos organismos, que no pueden categorizarse dentro de los animales, plantas, bacterias u hongos. Por medio de la fotólisis del agua (fotosíntesis) se genera oxígeno, proceso que se lleva a cabo gracias a los cloroplastos; estos microorganismos son capaces de retener la luz solar gracias a unas estructuras especiales llamadas cloroplastos. Las microalgas se encuentran en el agua, en el suelo e inclusive en el aire. Desde la antigüedad se han

utilizado como alimento o productos terapéuticos en las civilizaciones como la griega, romana, azteca y china. Estos microorganismos son unicelulares, pluricelulares o filamentosas que varían en tamaño y forma, viven en todos los hábitats, mayormente acuáticos, tanto en ambientes marinos como dulceacuícolas, y algunas en la tierra. Las más abundantes se encuentran formando parte del plancton de los océanos, estimándose que el 90% de la fotosíntesis total de la Tierra es realizado por ellos. (Abalde, Herrero, & Paredes, 1995)

Tienen importancia ecológica y económica gracias a su diversidad taxonómica. Para su crecimiento requieren de CO₂, Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Magnesio y otros nutrientes menores como metales, los cuales son esenciales por que actúan como cofactor de enzimas esenciales para su metabolismo. La importancia y las aplicaciones de estos microorganismos es que son el primer eslabón de la cadena alimenticia en el mar; se utilizan como fuente de Biocombustibles, fertilizantes, alimentación animal y otros usos en la industria alimentaria, y en la industria de medicamentos; son utilizados también en el tratamiento de aguas residuales; gracias a su capacidad de absorber CO₂ y otros gases de efecto invernadero como los óxidos de nitrógeno, contribuyen a mitigar el cambio climático. (Hernández Pérez & Labbé, 2014)

La biomasa en promedio de las Microalgas está constituida por 20-30% de lípidos, 40-50% de proteínas y el resto de carbohidratos (hasta 55% en algunas especies), constituyendo así el producto, siendo reconocidas como un excelente recurso medioambiental y biotecnológico. (Albarracín, 2007)

Las microalgas son muy efectivas en el tratamiento de aguas residuales especialmente porque tienen la capacidad de remover nutrientes y xenobióticos en estas aguas. Especies como

Scenedesmus quadricauda, *Chlorella miniata*, *Chlorella vulgaris* y *Chlorella sorokiniana* destacan por eliminar de manera eficiente metales pesados en las aguas residuales, además de poder crecer en medios contaminados (Forero, 2007). *C. vulgaris* y *S. dimorphus* son muy eficaces (>95%) en la biorremediación de amoníaco y fósforo que se encuentran en las aguas residuales; de igual manera, *Tetraselmis* sp, *Chlamydomonas* sp, y *Nannochloris* sp tienen una alta tolerancia a altas concentraciones de CO₂ (Forero, 2007).

Teniendo en cuenta esto, el uso de las microalgas se ha posicionado como uno de los métodos más eficaces para el tratamiento de aguas residuales. Su aplicación, se viene dando desde la primera mitad del siglo XX, de la mano de Cadwell, quien fue el primero en realizar estudios serios sobre el tema, desarrollados con mayor profundidad a finales de la década de 1950, por Oswald, y durante los años sesenta por las investigaciones llevadas a cabo en Hollister, California – Estados Unidos (Salazar, 2005).

El crecimiento en un cultivo de microalgas puede ser expresado como máxima biomasa alcanzada durante un determinado período de incubación o como tasa de crecimiento. El objetivo de contar algas no es solamente establecer la población (densidad) de células por mililitro que hay en un recipiente, sino también determinar numéricamente el grado de división celular en un determinado tiempo. Los resultados permiten estimar en cierto modo la situación de un cultivo y relacionarlo con la curva de crecimiento de esa población algal.

2.3.7.1 Medición del crecimiento celular.

El crecimiento de un cultivo de microalgas se expresa como el incremento de biomasa ya sea en forma de número de células, por cambios de densidad óptica o peso seco.

- ✓ Recuento celular: Se lleva a cabo utilizando una cámara de recuento de Neubauer y con la ayuda de un microscopio óptico, con el cual se cuentan las células dentro de cada cuadrante.
- ✓ Densidad óptica Se utilizan dos celdas de cuarzo en una colocando el volumen de agua destilada como blanco y en la otra, el volumen necesario de muestra del cultivo. Luego, se ubicaron las celdas en los espacios de un espectrofotómetro UV-VIS y se midió la densidad óptica a una longitud de onda de 650 nm.
- ✓ Método gravimétrico En un tubo de centrifuga limpio y previamente pesado, se añade una alícuota de 5 mL del cultivo. Se centrifuga por 15 minutos a 2500 RPM. Se decanta el medio suspendido y se resuspende con una solución salina al 3%. Una vez lista la muestra, se coloca el tubo en un horno de convección durante 24 horas a 105 °C y por diferencia se obtiene el peso seco. (Arredondo-Vega & Voltolina, 2006)

2.3.7.2 Cultivo de microalgas.

Existen dos tipos básicos de cultivo de microalgas: los cultivos abiertos, en los cuales la biomasa se encuentra expuesta a las condiciones del ambiente, y los cultivos cerrados (también llamados fotobiorreactores) en los que es posible aislar la biomasa de factores ambientales tales como contaminación y la lluvia; la escogencia del sistema de cultivo dependerá principalmente de las características de la biomasa a obtener (monoalgal o mezcla de varias), la resistencia de la cepa a

contaminación (alta salinidad, alta temperatura, etc) la capacidad del escalado, la transparencia y durabilidad del material disponible, los costos de su construcción y las posibilidades comerciales (Hernández Pérez & Labbé, 2014).

Los sistemas de cultivo abierto de microalgas, que se han popularizado desde los años cincuenta del siglo XX, se componen tanto de medios naturales (lagunas y estanques), como de otros artificiales con diseños variados: inclinados o de capa fina, circulares o de tipo carrusel. Posee grandes ventajas en el proceso de producción comercial de las microalgas, aunque las posibilidades de contaminación biológica, por la apertura constante, hacen muy difícil que pueda cultivarse un solo tipo de microalga, pues la contaminación del cultivo por bacterias y demás microorganismos tiende a ser bastante elevada. Otro inconveniente que puede presentarse constantemente está relacionado con la temperatura, ya que en los cultivos abiertos es bastante complejo mantenerla estable, pues, aunque la evaporación ejerce efecto de refrigeración, las oscilaciones diarias que se presentan no son amortiguadas, además de que la evaporación provoca cambios en la composición iónica del medio de cultivo (AST Ingeniería., 2014).

Los sistemas de cultivo cerrado fueron desarrollados para suplir las necesidades y las desventajas que poseen los sistemas tradicionales de cultivo abierto, lo que los ha hecho también exitosos. A diferencia de estos últimos, los sistemas de cultivo cerrado se encuentran aislados de la atmósfera, lo que presupone una reducción de la contaminación y la posibilidad de llevar a cabo mayores controles en las condiciones presentes en el cultivo, lo que se traduce en mayor rentabilidad y comercialización. Hasta el momento, se han desarrollado cuatro formas de cultivo cerrado, dependiendo de las necesidades y de las condiciones de las microalgas:

- ✓ Cámaras de algas: son sistemas adaptados para las pequeñas escalas de producción. Se caracterizan por ser cultivos de algas escalares, en donde el volumen del cultivo va en constante aumento. En las cámaras de algas, el control de la temperatura se hace por medio de la combinación de termostatos y calefactores, mientras la luz, que siempre es artificial, llega por medio de tubos fluorescentes, con el fin de distribuirse de forma homogénea, emitiendo bajas cantidades de luz. Los controles de luz en las cámaras de algas son especialmente estrictos, por lo que los recipientes poseen tamaños diversos, de acuerdo con las 23 especificaciones tenidas en cuenta, entre 2,000 y 4,000 lux y una temperatura promedio entre 15 y 22°C.
- ✓ Fotobiorreactores: los fotobiorreactores tienen la función de forzar al máximo las condiciones necesarias para el crecimiento óptimo de las microalgas, reduciendo lo más posible las condiciones de contaminación y las pérdidas de CO₂. Teniendo en cuenta el tipo de diseño que se realice, los fotobiorreactores pueden ser planos o tubulares, horizontales, verticales, inclinados (verticales), serpentines o múltiples. Si se toma como referencia el modo de operación, estos pueden ser impulsados por aire o por bombas, reactores de una fase o reactores de dos fases. Para escoger un tipo de fotobiorreactor debe tenerse en cuenta la especie de microalga a cultivar, los niveles de resistencia a condiciones medioambientales, los costos derivados de la operación, y los recursos hídricos y de suelo con los que se cuenta.

Además de los sistemas de cultivo abiertos y cerrados, en la actualidad se ha optado por llevar a cabo sistemas híbridos que mezclan pasos del sistema de fotobiorreactores y de lagunas abiertas o estanques. En la mayoría de los casos los sistemas de cultivo abierto poseen una primera etapa en la que se da la producción de biomasa por medio de fotobiorreactores para lograr un mejor

control del contexto ambiental, por lo que la contaminación baja, mientras se propicia una elevada división celular y por consiguiente, un crecimiento más acelerado de las microalgas. Cuando el cultivo ha llegado a los niveles deseados se pasan al sistema abierto de lagunas o estanques con el fin de complementar la adquisición de nutrientes y demás productos que durante la etapa de los fotobiorreactores fueron deficientes o inexistentes (AST Ingeniería., 2014).

Los sistemas de cultivo heterotróficos se caracterizan por permitir el crecimiento de algas sin la necesidad de luz empleando altas concentraciones de carbono orgánico. En estos sistemas el cultivo se lleva a cabo en biorreactores agitados; lo anterior permite un cambio sencillo de escala, además de generar mayor densidad en la biomasa producida. De igual manera, los sistemas de cultivo heterotróficos poseen un control bastante elevado del crecimiento y reducen los gastos de producción, aunque también generan un consumo de energía elevado. (AST Ingeniería., 2014)

Los factores que influyen en el crecimiento de las microalgas son similares, sin embargo, cada especie y subespecie de microalga presenta sus propias características respecto a sus condiciones óptimas de crecimiento, así como unas productividades máximas alcanzadas en diferentes configuraciones de sistemas de cultivo. En promedio, las microalgas duplican su biomasa en 24 horas. Sin embargo, en la fase exponencial algunas microalgas pueden doblar su biomasa en tiempos tan cortos como tres horas y media. (Abalde, Herrero, & Paredes, 1995). Su productividad está determinada, principalmente por el pH del medio, la salinidad, la disponibilidad y concentración de nutrientes, la intensidad y el tipo de luz, la densidad celular del cultivo, la temperatura y la contaminación o la depuración de otros microorganismos. A continuación se describen estos requerimientos:

✓ pH: Cada especie de microalga tiene un rango de pH en el cuál su crecimiento es óptimo, dependiendo de qué especies químicas este más habituada a asimilar. El pH en la mayoría de los cultivos de microalgas se encuentra entre 7-9 unidades, siendo entre 8,2-8,7 unidades, el más óptimo. El proceso fotosintético de fijación de CO₂ provoca un aumento gradual del pH en el medio debido a la acumulación de OH⁻, lo que puede promover la eliminación de nitrógeno en forma de amoníaco a la atmósfera y la eliminación de fósforo por precipitación de ortofosfatos. El control de pH se logra mediante la aireación o inyección controlada de CO₂, aunque también mediante la adición de ácidos o bases. El descenso del pH puede ser letal para el crecimiento de la microalga, sin embargo, los aumentos de pH suelen resistirlos. (Aplicaciones de las Microalgas: estado de la técnica., 2013)

✓ Salinidad: La salinidad del medio de cultivo tiene una gran influencia en el crecimiento de las microalgas, así como en la productividad de lípidos para biodiesel u otras sustancias de valor. Araujo en el 2011 hizo un estudio con 10 cepas de microalgas diferentes donde observo como cada especie respondía de modo distinto ante los cambios en la salinidad del medio cambiando de 25g/L a 35g/L, calculando los resultados de rendimiento y productividad de biomasa. Aunque algunas especies de microalgas no respondieron frente a los cambios en la salinidad la mayor productividad se alcanzó con *Chlorella vulgaris*, la cual alcanzó una relación de biomasa inicial: final de 1:10. (Moronta & Mora, 2006)

✓ Fotoperiodo: Uno de los principales parámetros a considerar es la intensidad lumínica. En ausencia de limitación por nutrientes, la fotosíntesis va aumentando con el incremento de la intensidad lumínica, hasta que se alcanza la máxima tasa de crecimiento por cada especie en el punto de saturación por luz. Si se pasa este punto se alcanza el denominado punto de fotoinhibición,

obteniendo resultados perjudiciales para la misma y productividad del cultivo. (Abalde, Herrero, & Paredes, 1995)

✓ **Agitación:** la agitación facilita la eficiencia en el transporte, impidiendo la sedimentación de las microalgas y su adherencia a las paredes del recipiente que lo contiene, homogeniza el pH y asegura la distribución de los gases y de la luz. Con una correcta agitación se somete a las microalgas a ciclos rápidos de mezclado en las que en cuestión de milisegundos pasan de una zona oscura a una zona iluminada. La agitación incide debido a que en primer lugar ésta garantiza una distribución homogénea de las células y los nutrientes dentro del cultivo, mejora la distribución de la luz y evita que las células se sedimenten en el medio de cultivo. (Acosta, 2004)

✓ **Temperatura:** La producción algal se incrementa proporcionalmente con la temperatura hasta llegar a una temperatura óptima de cada especie. Cuando se está por encima de esta temperatura, se aumenta la respiración y la foto respiración reduce la productividad global. La temperatura óptima varía entre las especies, pero en general está entre 28°C y 35°C. (Abalde, Herrero, & Paredes, 1995)

✓ **Medio de cultivo:** es una disolución acuosa que transporta los nutrientes inorgánicos que necesitan las microalgas para su crecimiento. El suministro de medio de cultivo y las concentraciones de los nutrientes deben estar acoplados con la producción de biomasa de forma que se suministren en cantidad suficiente para que nunca se produzca una limitación que tendría como consecuencia una disminución en la productividad de biomasa o incluso alguna disfunción del cultivo como la fotoinhibición. Los principales nutrientes necesarios son:

- Agua: además de transporte, es un nutriente que suministra los electrones ($H\cdot$) necesarios para la reducción del CO_2 .
- Carbono: normalmente suministrado aparte como CO_2 , aunque puede suministrarse como bicarbonato, considerablemente más caro.
- Oxígeno: suministrado tanto por el H_2O como por el CO_2 . Sin embargo es sólo el oxígeno del CO_2 el que se incorpora en la biomasa.
- Nitrógeno: Es el cuarto elemento más importante por volumen ya que forma parte de las proteínas y nucleótidos de la biomasa. Suministrado como NO_3 o NH_4 .
- Fósforo: suministrado como fosfato, forma parte de importantes intermedios metabólicos, lípidos, enzimas y multitud de especies bioquímicas.

Adicionalmente existe una gran cantidad de otros nutrientes que pueden ser necesarios dependiendo de la especie. Según la cantidad en la que se necesiten se suelen clasificar como macronutrientes o micronutrientes, ya que es importante para la preparación del medio.

- Macronutrientes: sales como cloruro de sodio y magnesio, sulfatos y sales de calcio. Pueden aparecer en concentraciones de hasta 30 g/L cuando se trata de especies marinas y hasta de 100 g/L en microalgas halófilas. Estos macronutrientes no se consumen en la generación de biomasa o se incorporan en muy pequeña medida. Su objetivo principal es mantener la presión osmótica y el equilibrio de electrolitos.
- Micronutrientes: Son elementos que actúan como cofactores de enzimas y aparecen en muy pequeñas cantidades, a veces de microgramos por litro. Si se ponen en exceso pueden actuar como un veneno, como es el caso del cobre, que es un conocido alguicida.
(Fernandez Sevilla, 2014)

✓ Demanda química de oxígeno (DQO) El DQO es la medida del equivalente de oxígeno del contenido de materia orgánica susceptible de oxidación por medio de un agente químico oxidante fuerte. En otros términos, es la cantidad de oxígeno que requiere el agua para descomponer toda la materia orgánica e inorgánica que tiene. Este parámetro requiere de unas condiciones de análisis específicas como un tiempo mínimo de reacción de dos horas y una serie de sustancias analíticas específicas. (Standar Methods for the examination of water and wastewater. 22nd Edition., 2012)

✓ Alcalinidad: La alcalinidad de un agua puede definirse como su capacidad para neutralizar ácidos, su capacidad para reaccionar con iones hidrógeno, su capacidad para aceptar protones o como la medida de su contenido total de sustancias alcalinas (OH^-). La determinación de la alcalinidad total y de las distintas formas de alcalinidad es importante en los procesos de coagulación química, ablandamiento, control de corrosión y evaluación de la capacidad tampón de un agua. (Romero Rojas J. A., 2005)

✓ Turbidez: La turbidez o turbiedad es una expresión de la propiedad o efecto óptico que es causado por la dispersión e interferencia de los rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua; en otras palabras, es la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz sea reemitida y no transmitida a través de la suspensión. La turbidez en el agua puede ocasionarse por una gran cantidad de materiales que se encuentren en suspensión que varían en tamaño, desde dispersiones coloidales hasta partículas gruesas, entre otras arcillas, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, organismos planctónicos y microorganismos.

✓ Conductividad: La conductividad del agua es una expresión numérica de su habilidad para transportar una corriente eléctrica, que depende de la concentración total de sustancias disueltas

ionizadas en el agua y de la temperatura a la cual se haga la determinación. Por tanto, cualquier cambio en la cantidad de sustancias disueltas, en la movilidad de los iones disueltos y en su valencia, implica un cambio en la conductividad. Por esta razón, el valor de la conductividad se usa mucho en análisis de agua para obtener un estimativo rápido del contenido de sólidos disueltos. (Romero Rojas J. A., 2005)

✓ Sólidos totales: Los sólidos totales (ST) se definen como la materia que permanece como residuo luego de una evaporación y secado a 103°C-105°C. El valor obtenido de los sólidos totales incluye tanto materia disuelta (porción de sólidos totales que pasa a través del filtro), como materia no disuelta (porción de sólidos totales que es retenida por el filtro). Los análisis de sólidos son de importancia en el proceso de tratamiento biológico y físico de aguas residuales, para evaluar el cumplimiento de las limitaciones que regulan vertimiento (Carpio, 2007).

✓ Sólidos volátiles: Los sólidos volátiles (SV) son aquellos que se volatilizan a una temperatura de 550°C. Cuando los sólidos totales se someten a combustión bajo una temperatura de 550°C durante 20 minutos, la materia orgánica se convierte en dióxido de carbono y agua. Esta pérdida de peso se interpreta en términos de materia orgánica o volátil. (American Public Health Assosiation, American Water Works Assosiation, Water Enviroment Federeation, 2012)

✓ Sólidos suspendidos totales: Los sólidos suspendidos totales (SST), se consideran como la cantidad de residuos retenidos en un filtro de fibra de vidrio con tamaño de poro nominal de 0.45 micras y hacen referencia al material Particulado que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua superficial y/o residual. Estos sólidos causan turbiedad en el agua y reducen la penetración

de la luz solar al cuerpo de agua; los sólidos suspendidos totales son una limitante para el crecimiento de vegetación en los cuerpos de agua. (CAN, 2005)

✓ Sólidos suspendidos volátiles Los sólidos suspendidos volátiles (SSV) son los sólidos que pueden ser incinerados o calcinados a una temperatura de $500 \pm 50^{\circ}\text{C}$, la concentración de estos sólidos se suele considerar como una medida aproximada del contenido de materia orgánica. (METCALF & Eddy, 2003)

2.4 Normatividad Ambiental Colombiana para la acuicultura

Como ente rector de la política de pesca y acuicultura se encuentra el “Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural” (MADR), que a través del Artículo 16 del Decreto No. 1985 del 12 de septiembre 2013, creó el Viceministerio de Asuntos Agropecuarios cuyas funciones en términos específicos del sector de pesca y acuicultura contienen entre otras: a) proponer e implementar las políticas para mejorar la productividad y la competitividad pesquera y acuícola; b) Proponer y diseñar instrumentos de política que promuevan la productividad y competitividad pesquera y acuícola; c) Proponer y hacer seguimiento a la implementación de las políticas sobre la productividad y la competitividad pesquera y acuícola (MADR, 2013).

A partir del Viceministerio de Asuntos Agropecuarios y bajo el Artículo 18 de este Decreto se creó la Dirección de Cadenas Pecuarias, Pesqueras y Acuícolas, cuyas funciones son las siguientes: a) Diseñar y evaluar las políticas, planes, programas y proyectos para el fortalecimiento de las cadenas, pesqueras y acuícolas en los temas relacionados con la producción, la asistencia técnica, la comercialización, la asociatividad, las alianzas productivas, la formalización empresarial y

laboral, la infraestructura productiva, la inserción en los mercados internacionales y la generación de valor agregado en los productos agropecuarios; b) proponer normas, instrumentos y procedimientos que permitan el fortalecimiento de las cadenas pesqueras y acuícolas. Así mismo, mediante Decreto 4181 de 2011 del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural se crea la Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca- AUNAP. (MADR, 2013).

Las principales normas que rigen a la pesca y la acuicultura, se consignan en la ley 13/90 y el decreto reglamentario 2256/91, en los que se trata el tema de los permisos de cultivo (producción, procesamiento y comercialización) o licencias de funcionamiento que expide la autoridad competente para su ejercicio, el INCODER, a través de la Subgerencia de Pesca y Acuicultura, por medio de la oficina de registro y control.

En el aspecto ambiental, el permiso de concesión de aguas y la presentación de planes de manejo ambiental, son exigidos por las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), en forma directa o a través del cumplimiento de las guías ambientales, que para el caso del camarón ya existen. Actualmente se están realizando las de piscicultura, con el apoyo de los consejos regionales de las cadenas productivas, con lo cual se persigue que la actividad se realice en forma armónica con el medio ambiente y se busque la sustentabilidad ambiental.

El permiso de concesión de aguas superficiales es necesario para obtener el derecho de usar o aprovechar las aguas de uso público para: abastecimiento doméstico en los casos que requiera derivación, riego y silvicultura, abrevaderos cuando se requiera derivación, industrial, generación térmica o nuclear de electricidad, explotación minera y tratamiento de minerales, explotación petrolera; inyección para generación geotérmica, generación hidroeléctrica, generación cinética

directa, transporte de minerales y sustancias tóxicas, acuicultura y pesca, recreación y deportes, usos medicinales y otros usos minerales, está regulado por Decreto 2811 de 1974

El Permiso de vertimiento, es un permiso para generar vertimientos en las aguas superficiales, marinas, o al suelo asociado a un acuífero, está regulado por el Decreto 3930 de 2010.

La resolución 1280 de 2010, establece la escala tarifaria para el cobro de los servicios de evaluación y seguimiento de las licencias ambientales, permisos, concesiones, autorizaciones y demás instrumentos de manejo y control ambiental para proyectos cuyo valor sea inferior a 2.115 smmv y se adopta la tabla única para la aplicación de los criterios definidos en el sistema y método definido en el artículo 96 de la Ley 633 para la liquidación de la tarifa

En los departamentos y municipios del país se han realizado los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) en los que se han determinado las actividades económicas importantes. En algunos de estos planes se tiene a la acuicultura como una actividad importante para el desarrollo de la región.

El Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos - INVIMA, es la entidad dependiente del Ministerio de Salud a quien corresponde velar por la inocuidad de los productos alimenticios en general.

2.4.1 Política Nacional de Pesca y Acuicultura – PNPA

Actualmente se adelanta la formulación de la “Política Nacional de Pesca y Acuicultura” a través del “Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural”. Dentro de esta formulación se destaca que la actividad de pesca y acuicultura en Colombia, constituyen un sector productivo que legalmente es de interés social y de utilidad pública, de acuerdo al Estatuto General de Pesca, Ley 13 de 1990, y su Decreto Reglamentario 2296 de 1991. El objeto de estos instrumentos es regular, ordenar, administrar, desarrollar y aprovechar en forma sostenible los recursos pesqueros y de acuicultura, y se complementa con lo establecido en la Ley 99 del 1993, la cual establece la importancia de proteger y aprovechar en forma sostenible la biodiversidad, y de promover el manejo integral del medio ambiente en su interrelación con los procesos de planificación económica, social y física (MADR, 2013).

2.4.2 Plan Nacional de Desarrollo – PND 2014 – 2018

Dentro del Plan Nacional de Desarrollo 2014 – 2018 – Prosperidad para Todos, el Capítulo VI sobre Sostenibilidad Ambiental y Prevención del Riesgo, se encuentra incluido el apoyo a la recuperación del sector pesca y acuicultura y correspondiente investigación y transferencia de tecnología, como parte de los lineamientos y acciones estratégicas del sector agropecuario con relación a la gestión ambiental integrada y compartida. (PND 2014-2018).

El sector productor privado ha conformado asociaciones gremiales en diferentes regiones del país, reconocidas por el Gobierno Nacional y que son consideradas para la fijación de las políticas, toma de decisiones, concertación de las medidas y normas que se adopten para el desarrollo, administración y control de la actividad. Igualmente son apoyadas por el Gobierno Nacional y

Regional a través de la Política Nacional de Cadenas Productivas y de Investigación y Desarrollo Tecnológico A través de ella, en cada una de sus regiones, pueden acceder a la asignación de recursos para la realización de programas de investigación o innovación tecnológica del sector. Como también contribuir a la solución integral de su problemática, con la participación de todos los eslabones de la cadena de producción de la acuicultura.

3. METODOLOGIA

3.1 Enfoque de la Investigación.

Este proyecto se basó en una investigación experimental de naturaleza cuantitativa. Se midió la contaminación causada por la actividad piscícola de la Finca El Rincón; Se desarrolló un diseño experimental de una planta de tratamiento de aguas residuales orientada a cubrir la ausencia de conocimientos tecnológicos y un manejo ambiental adecuado en el manejo de los residuos del cultivo de Trucha; Se utilizó la estadística para el análisis de la información, usando estadística descriptiva, utilizando valores promedio de los experimentos por triplicado de las variables; carga orgánica, nitratos y fosfatos.

3.2 Zona de estudio

Las aguas residuales a tratar fueron obtenidas de la granja piscícola El Rincón ubicada en la Vereda Presidente del municipio de Chitagá, Norte de Santander, Colombia ubicadas a 3432 msnm, georreferenciada con coordenadas: 7°00'625"N, 72°40'899"W y con una temperatura media aproximada de 15°C. Dentro de granja piscícola está ubicada la laguna de Comagüeta, que hace parte del Páramo de Almorzadero, que comprende principalmente los municipios de Chitagá y Silos en Norte de Santander y Cerrito, Guaca y Tona en Santander. El páramo comprende unas 156.000 hectáreas de extensión que se ubican entre los 2.800 y 4.530 metros sobre el nivel del mar sobre ambos flancos de la Cordillera Oriental. (CORPONOR, 2010)

El complejo lagunar de la región, se considera una belleza paisajística con especies de fauna y flora representativa del páramo bajo o sub-páramo, una vegetación arbustiva, con predominio de elementos leñosos que se establecen desde el páramo bajo hasta el superpáramo. Con mayor frecuencia encontramos especies de *Diplostephium*, *Pentacalia*, *Castilleja* y *Hypericum*. Los arrayanes y los árboles de carbón hacen parte de la flora autóctona del lugar (Capacho Navia, 2016). La figura 2, muestra la ubicación de la granja piscícola y dentro de ella la Laguna Comagueta.

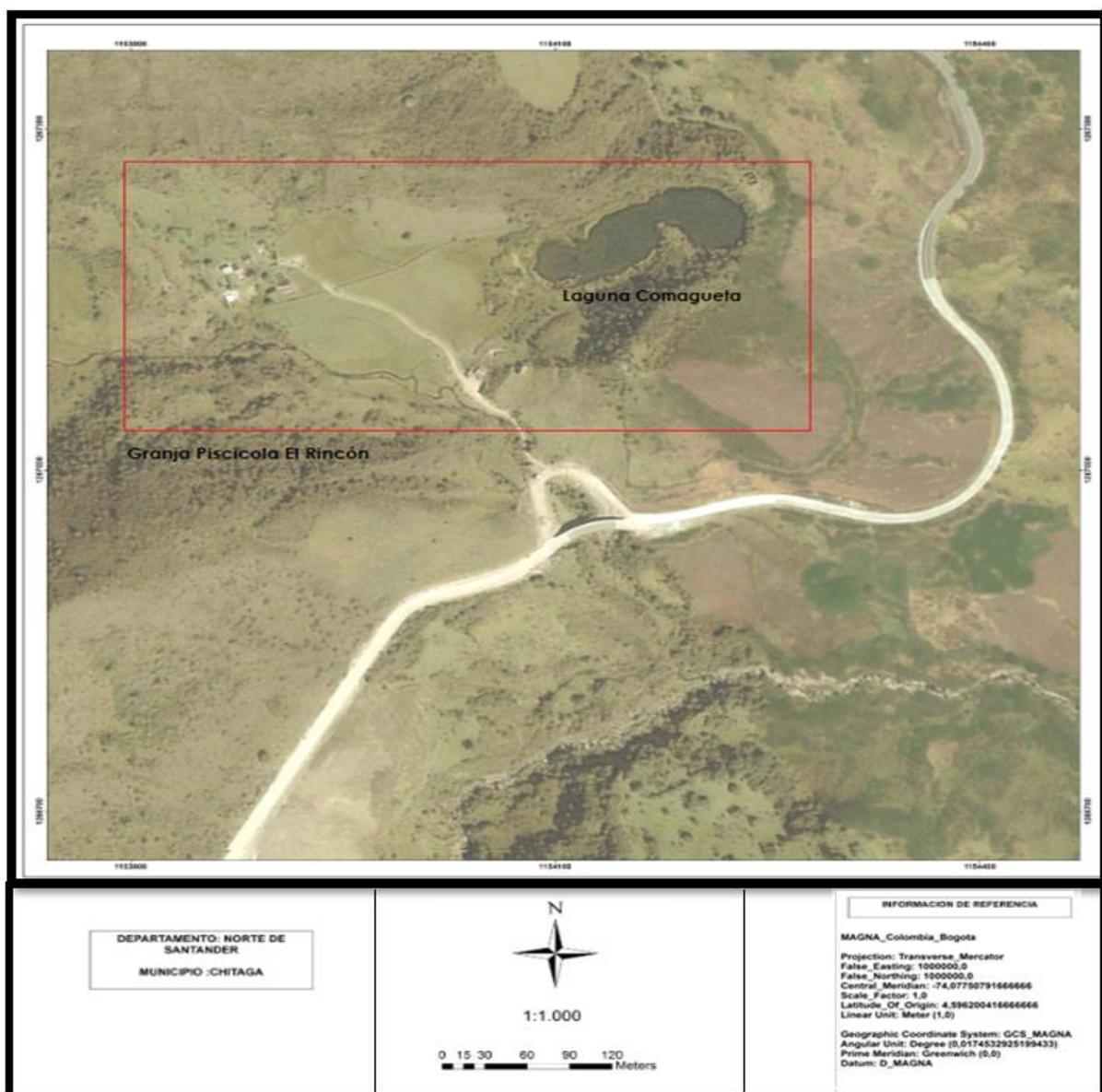


Figura 2. Ubicación de la granja piscícola El Rincón. Fuente: Autor.

3.3 Fases de la Investigación

3.3.1 FASE I.

En esta primera fase se realizó el diagnóstico de la calidad de las aguas procedentes de la industria acuícola y su carga contaminante: En esta fase se realizó la caracterización físico-química y microbiológica de las aguas residuales procedentes de la industria acuícola ubicada en la Finca El Rincón, de la Vereda Presidente en el municipio de Chitagá para determinar la carga contaminante. Con el fin de recolectar información sobre el proceso productivo, se realizó un muestreo para plasmar un balance aproximado del agua de entrada y salida (consumos de agua en procesos para el cultivo y el lavado de los tanques que se realiza semanalmente), las concentraciones de los residuos generados y el uso eficiente de las materias primas. La composición o las características de las aguas residuales se determinaron en el laboratorio, para encontrar las concentraciones de los diferentes parámetros como los nitratos, fosfatos, sulfatos, amonio y DQO.

3.3.1.1 Medición de los tanques de crianza y volúmenes de agua

Para medir el volumen de agua que contiene cada uno de los tanques de crianza, se multiplica el ancho por el largo por la altura y nos dará el volumen de agua en cada estanque (Tabla 1). Es recomendable tomar las medidas en metros, para que el resultado sea en metros cúbicos.

Tanque	Ancho (m)	Largo (m)	Alto (m)	Altura H2O (m)	Volumen tanque (m ³)	Volumen agua (m ³)
1	1	5	1	0,7	5	3,5
2	1	5	1	0,7	5	3,5
3	1	5	1	0,7	5	3,5
4	1	5	1	0,7	5	3,5
5	1	4	0,6	0,4	2,4	1,6
6	1,5	9	1	0,7	13,5	9,45
7	1,5	7	1	0,7	10,5	7,35
8	2	9	1	0,7	18	12,6
					64,4	45

Tabla 1. Medición de los tanques de crianza, volumen de los tanques y volúmenes de agua

3.3.1.2 *Medición del caudal de entrada en los estanques*

El caudal que llega a los estanques es de mucha importancia debido a que este está relacionado directamente con el nivel de oxígeno disponible para las truchas y con la densidad de carga. Cada uno de los tanques de crianza tiene 3 entradas de agua, 1 con una tubería de 2 pulgadas de diámetro y 2 con una tubería de 1 pulgada de diámetro. Se realizó la medición del caudal en una tubería: con ayuda de una cubeta de 20 L y un cronómetro, se tomó el tiempo en que la cubeta tarda en llenarse completamente. Se realizaron al menos cuatro repeticiones y se obtuvo un promedio para que el valor sea lo más acertado posible. Luego, se procede a dividir el volumen (20L) dentro del promedio de tiempo obtenido y se obtiene el caudal en litros/segundo. En la entrada de agua con una tubería de 1 pulgada, se coloca la cubeta para que se llene de agua y toma 43,3 segundos (promedio de 4 tomas) en llenarse completamente. Luego se divide 20 L entre 43,3, se obtiene que el caudal para esta entrada de agua es de 0,46 l/s. por tubo. Lo multiplicamos por los 4 tubos (el tubo de 2 pulgadas se toma como si fueran 2 de 1 pulgada) que entran al tanque tenemos un caudal de 1,84 l/s.

3.3.1.3 Recambio de agua en estanques.

El recambio es lo que dura en renovarse toda el agua de un estanque en un tiempo determinado. Se puede averiguar el recambio del estanque por observación; por ejemplo, para el estanque 1, que mide 5m de largo por 1m de ancho y 1m de profundidad, el volumen total es de 5 metros cúbicos (Volumen: ancho x largo x profundidad). El caudal que llega al estanque es 1,84 litros por segundo; se multiplica el caudal que llega al estanque, por 60 segundos para saber el caudal por minuto, que corresponde a 110,4 litros, luego se multiplica por 60 para obtener el caudal por hora que es igual a 6624 litros y finalmente se multiplica por 24 que corresponde a las horas del día, para un total de 158976 litros por día. Estos 158976 litros/día se dividen entre 1000 para pasarlo a metros cúbicos (un metro cúbico es igual a 1000 litros) para un total de 158,976 metros cúbicos de agua que pasan por el estanque al día. Para calcular el recambio del estanque al día, se dividen los metros cúbicos que pasan por el estanque al día entre el volumen del estanque (5 metros cúbicos): Recambio: $158,976 \text{ metros cúbicos por día} \div 5 \text{ metros cúbicos}$ El recambio del estanque es de 31,7952 veces al día, lo que quiere decir que cada 1 hora con 32 minutos el agua del estanque se renueva completamente.

3.3.1.4 Toma de muestras.

Se realizó toma de muestras de aguas residuales en tres puntos de la piscifactoría: el primero antes de los tanques de criadero, el segundo en la salida del proceso y el tercero a la entrada de la laguna Comagüeta (Figura 3). Se realizaron 9 monitoreos a cada uno de los puntos establecidos, cada 8 días, debido a que el lavado de los tanques de crianza se realiza semanalmente y es el punto más alto de descarga de contaminantes a la laguna.

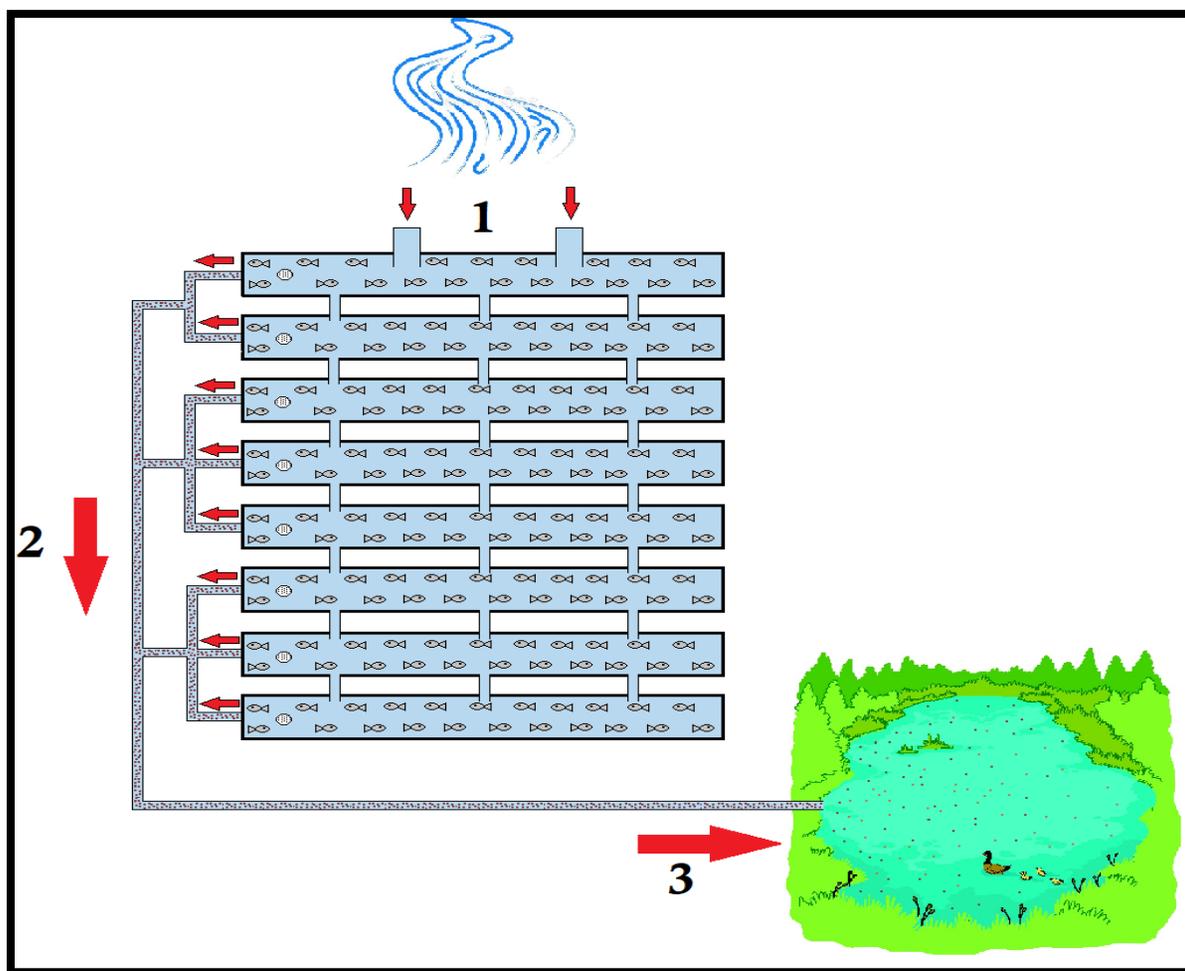


Figura 3. Distribución de puntos de muestreo. Fuente: Autor.

3.3.1.5 *Análisis fisicoquímico.*

El agua recolectada fue depositada en recipiente plástico de dos puntos cinco (2,5) litros para realizar análisis de nitratos (Standard methods 4500C unidades mg/L de NO_3), Fosfatos (Standard methods 4500P, unidades mg/L de PO_4^{3-}) y DQO (Standard methods 5220, unidades mg/L) (APHA/AWWA/WEF., 2012) (Ver Anexo 3). Estas muestras fueron trasladadas en cadena de frío para su análisis al laboratorio de Control y Calidad de la Universidad de Pamplona. Utilizando el equipo multiparámetro modelo Multi 340i/set WTW se registraron in situ los siguientes parámetros: pH (Electrométrico unidades de pH), temperatura (Electrométrico $^{\circ}\text{C}$), oxígeno

disuelto (Electrométrico unidades mg/L) y conductividad (Electrométrico microsiemens μ s).

(Figura 4)



Figura 4. Toma de muestras y análisis fisicoquímico. Fuente: Autor. Técnica digital. Finca El Rincón - Laboratorio de Biotecnología. Universidad de Pamplona

3.3.1.6 *Análisis bacteriológicos*

Para la determinación de la calidad bacteriológica de las aguas residuales tomadas para los análisis físico-químicos se realizaron los análisis de Bacterias Coliformes Totales y Bacterias Coliformes Fecales mediante recuento en placa (unidades formadoras de colonias UFC). El agua recolectada fue depositada en recipientes de vidrio esterilizados de un (1) litro y trasladados en cadena de frío al Laboratorio de Biotecnología de la Universidad de Pamplona.

3.3.2 FASE II

En esta fase se seleccionaron los elementos del bioproceso para la construcción de la propuesta del sistema biológico

3.3.2.1 *Aislamiento de Microalgas*

Fueron recolectadas muestras de la Laguna Comagüeta realizando un arrastre con una malla de fitoplancton de 25 micras de poro, luego fueron sembradas en medio líquido Bold (Lin, 2005) y posteriormente fueron pasadas en agar Bold para el aislamiento posterior en cultivo axénico. Se utilizó adicionalmente una cepa de *Arthrospira* sp suministrada por el cepario de Microalgas del Laboratorio de Biotecnología. Las microalgas se adaptaron periódicamente a concentraciones mayores de aguas residuales acuícolas hasta alcanzar el 100%. (Ver Anexo 4)

3.3.2.2 *Fotobiorreactores evaluación de biorremediación*

Se trabajó con fotorreactores de 3 L, con volumen de trabajo de 2 L, flujo de aire de 1L/ m y una DFF de $250 \mu\text{molm}^{-2} \text{s}^{-1}$ con fotoperiodo de 12-12. Se realizaron tres tratamientos, cada uno con una microalga. Los tratamientos se llevaron a cabo por triplicado. Se realizó el monitoreo de nitratos, fosfatos, DQO y número de células por el método de recuento directo en cámara de Neubauer, durante 18 días.

3.3.2.3 *Análisis estadístico*

Para el análisis de la información se aplicó estadística descriptiva utilizando valores promedio de los experimentos por triplicado de las variables; carga orgánica, nitratos y fosfatos.

3.3.2.4 *Criterios de diseño del sistema de tratamiento biológico*

Para determinar los criterios de diseño del sistema se llevó a cabo una recopilación de información bibliográfica, con verificaciones puntuales de campo sobre la calidad del agua del proceso, con el fin de conocer las características del agua residual acuícola. Con estos datos se determinó el modelo del tratamiento de aguas residuales que mejor eliminara la contaminación indicada según los parámetros obtenidos. Se tuvieron en cuenta los siguientes factores: tiempo de retención, densidad de los sólidos suspendidos, velocidad del agua, distribución del flujo y profundidad de la laguna. En general el tiempo de retención depende del área, la profundidad del lago y del tamaño de las partículas suspendidas. Además, se tuvieron en cuenta la revisión de información sobre el cultivo de trucha, variables de operación del sistema, condiciones ambientales del lugar su incidencia en los resultados obtenidos.

Las partes del sistema (sedimentador, fotorreactores) se fabricaron con láminas de polimetilmetacrilato (PMMA) de 5mm de espesor. Este material fue seleccionado por las amplias posibilidades de termoformado, baja densidad (1.19 g/mL), alta transparencia (93%) y disponibilidad; además la calidad óptica con la que se aprecian los objetos a través de la lámina de Polimetilmetacrilato (PMMA) es casi perfecta.

El tratamiento primario de las aguas residuales piscícolas se realizó con un sedimentador primario de forma circular, cuya función es eliminar los sólidos en suspensión a partir de procesos de sedimentación simple por gravedad, y posteriormente el tratamiento con un consorcio de las dos microalgas CCBio1 (*Chlorella sp*) y CCBio2 (*Scenedesmus sp*), que obtuvieron las mejores eficiencias en el experimento de Biorremediación. La depuración de aguas residuales con estos consorcios permitió aumentar la eficiencia del sistema para eliminar la materia orgánica, así como

el nitrógeno y el fósforo presentes en el agua residual hasta niveles aptos para su vertido (<20% en remoción). La recuperación de los nutrientes contenidos en el agua residual se propuso para hacer del bioproceso un proceso sostenible, así como el potencial aprovechamiento de la biomasa producida lo hace rentable económicamente, ya que esta se puede utilizar como biofertilizante de los cultivos (papa, durazno) presentes en la Granja. En este sentido, este proyecto está enfocado a esta mejora y validación de la tecnología de depuración de aguas residuales basada en consorcios de microalgas. En concreto se persigue mejorar el sistema biológico y el modo de operación en función de la composición del agua residual, para maximizar la capacidad de tratamiento de agua residual y la producción de biomasa.

Para la operación del sistema biológico en los fotorreactores airlift y laminar, se tuvo en cuenta, algunos factores que influyen en el crecimiento de las microalgas como son la presencia de protozoos, estos microorganismos se alimentan de las microalgas y se controlaron calentando el agua antes del proceso de inoculación del consorcio de las microalgas (CCBio1-CCBio2). El objetivo de esta fase fue determinar la posibilidad de utilizar consorcios de microalgas para depurar estos efluentes, evaluando dos fotorreactores y validar la robustez de la tecnología en condiciones reales a escala piloto.

A continuación se presenta el diseño y la descripción de cada uno de las piezas del sistema a implementar.

✓ Tanque de alimentación (Figura 5)

Este tanque tiene un volumen de 60 litro, es plástico, se usó uno de color blanco en el sistema aunque puede ser de cualquier color. Posee en su parte inferior una tubería de 2" y una llave de

paso del mismo tamaño. La función del este tanque es almacenar y suministrar el agua residual al sistema. Se ubicó en la parte más alta del sistema, a través de una estructura metálica para aprovechar la acción de la gravedad en la alimentación del sedimentador primario. Este tanque se puede desmontar para su lavado.



Figura 5. Tanque de alimentación. Fuente: Autor. Técnica digital. Laboratorio de Biotecnología. Universidad de Pamplona

✓ Sedimentador primario

La sedimentación, es un proceso físico de separación por gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo del sedimentador. Está en función de la densidad del líquido, del tamaño, del peso específico y de la morfología de las partículas. A esta operación de sedimentación se le suele denominar también decantación. (Cardenas Guzman & Medina Rincon, 2017). El objetivo fundamental de este sedimentador o decantador primario es doble: por un lado permite eliminar los sólidos en

suspensión (en un 60%, aproximadamente) presentes en la aguas residuales y la materia orgánica (en un 30%, aproximadamente), y por otro lado, protegen los procesos posteriores de tratamiento biológico de la intrusión de fangos inertes de densidad elevada.

Los sólidos en suspensión presentes en el agua residual influyen adversamente en la actividad de los fotorreactores obstruyendo el paso de la luz solar, por lo tanto disminuyen la actividad fotosintética de las microalgas trayendo como consecuencia la disminución de la concentración de oxígeno disuelto en el agua. (OPS/CEPIS, 2005)

Para evaluar la cantidad de sólidos en suspensión en el agua residual que se podían sedimentar se partió del cálculo de los sólidos sedimentables usando un Cono de Imhoff. (Giraldo, 1995). En primer lugar, se agitó la muestra del agua residual y se depositó un litro de esta en un cono de Imhoff, se dejó sedimentar por 45 minutos, se agitó suavemente el líquido contenido en el cono con un agitador, para desprender y sedimentar los sólidos de la pared del recipiente. Posteriormente se sedimentó durante 15 minutos más, y se tomó la cantidad de sólidos sedimentables en ml/l, leyendo directamente en el cono. Se obtuvo como resultado un valor de sólidos sedimentables de 125 ml/l/hora. Esta evaluación se realizó durante los 9 muestreos y se registraron valores similares al anterior. La figura 6, muestra el resultado obtenido en la evaluación de los sólidos sedimentables antes y después de 1 hora.



Figura 6. Evaluación de sólidos sedimentables antes y después de 1h. Fuente: Autor. Técnica digital. Laboratorio de Biotecnología. Universidad de Pamplona

Los sólidos sedimentables del agua residual piscícola tienen un valor promedio de 125 ml/l, es decir que de 1000 ml de agua residual, 125 ml es lodo y 875 ml es agua. Para saber cuánto es el volumen de trabajo del sistema, sabemos que el 12,5% de la muestra son lodos y el 87,5% es agua. Si el volumen del reactor air-lift es 22 l y del reactor laminar es 22 l, se supone que el volumen de agua necesario para el arranque del sistema es 45 l (libre de sólidos sedimentables), entonces,

$$\begin{array}{l}
 1 \text{ L} \quad \longrightarrow \quad 875 \text{ ml de agua clarificada} \\
 X \quad \longrightarrow \quad 45000 \text{ ml de agua clarificada} \\
 X = (1\text{L} \cdot 45000 \text{ ml}) / 875\text{ml} = 51,42 \text{ L}
 \end{array}$$

Para el arranque se necesitan 51,42 litros de agua, más el volumen necesario para los análisis iniciales, es decir se necesitan alrededor de 60 L de agua residual piscícola. El sedimentador que

se propone implementar para el sistema es un tanque circular con una tolva en su parte inferior en la que el agua entra por la parte superior proveniente del tanque de alimentación, los sólidos caen al fondo del tanque que tiene una pendiente de 14° respecto a la horizontal. Por tanto el volumen del sedimentador es el resultado de la suma del volumen del cilindro y el volumen de la tolva. (RAS, 2000)

Para calcular el volumen del cilindro, se propone que el cilindro tenga un diámetro de 40 cm y una altura h, usando la ecuación del volumen del cilindro para tener el volumen del tanque (sin la tolva).

$$V_{\text{cilindro}} = \pi * r^2 * h = \pi * (20)^2 * 50 = 62,830 \text{ L}$$

El tanque debe tener aproximadamente una altura de 50 cm, si el diámetro inicial es 40cm, sumado al volumen del cono o la tolva, se calcula el volumen del tanque de sedimentación mayor al volumen de trabajo. (Figura 7)

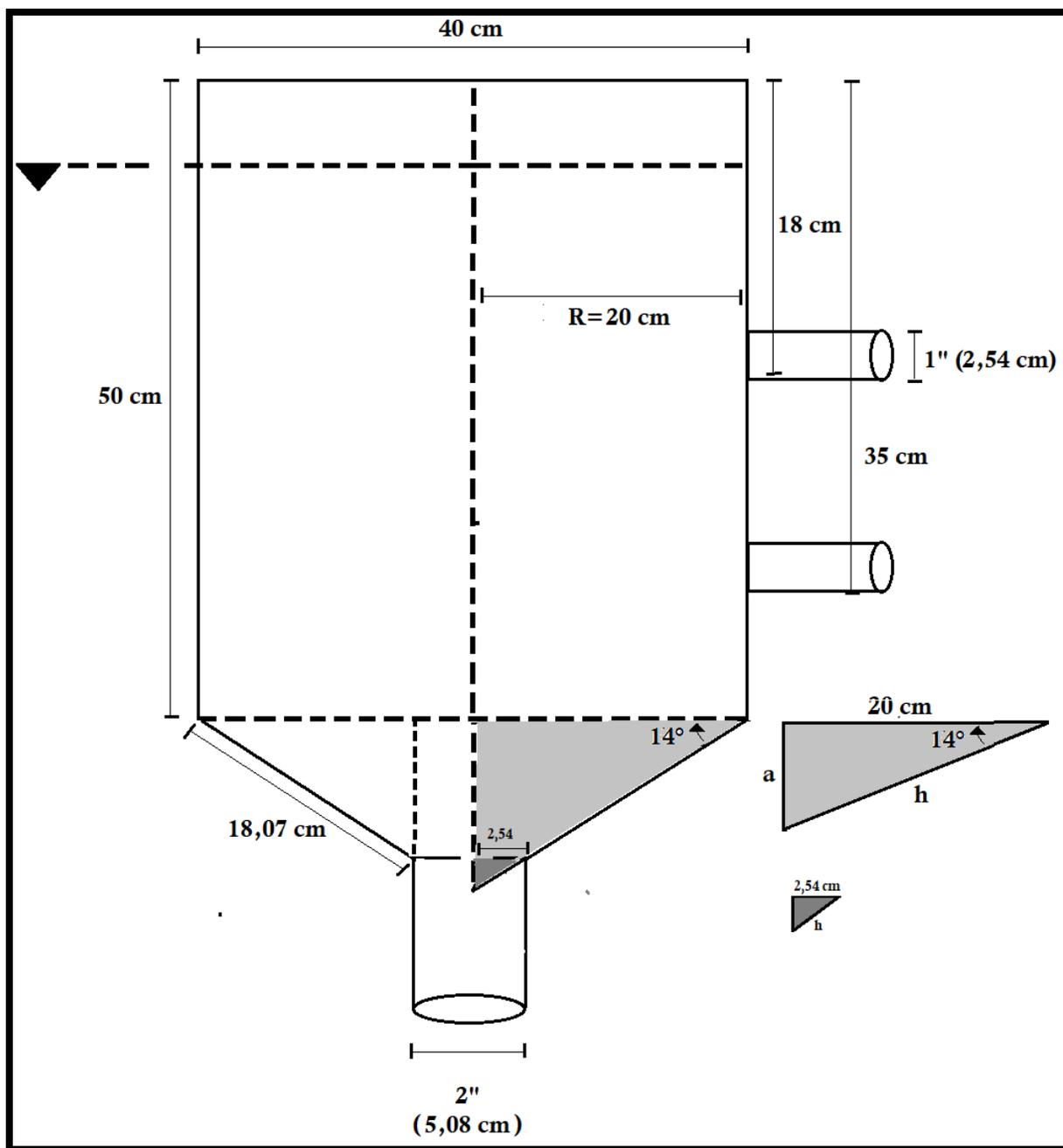
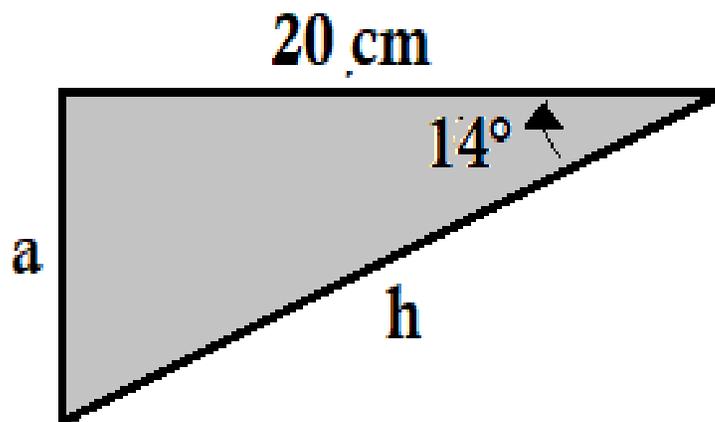


Figura 7. Diseño del sedimentador primario. Fuente: autor

La tolva del sedimentador tiene una inclinación de 14° y conociendo el radio del tanque que es 20 cm, se usa la función coseno y el teorema de Pitágoras para calcular la altura del cono y el generatriz del cono (la altura del triángulo rectángulo)



$$\cos 14^\circ = 20 \text{ cm} / h$$

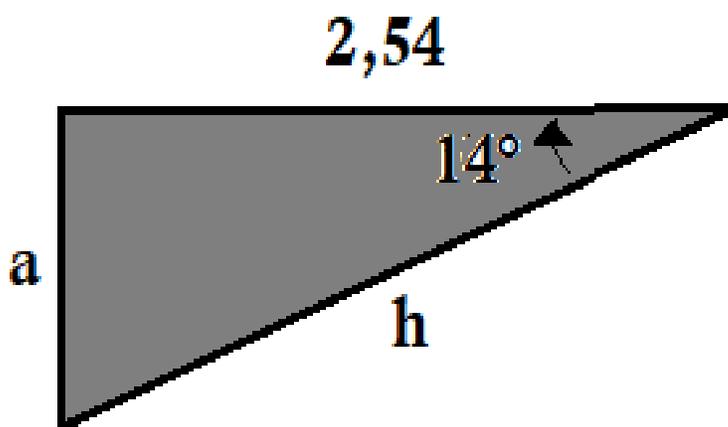
$$h = 20 \text{ cm} / \cos 14^\circ$$

$$h = 20,61 \text{ cm}$$

$$\text{Hipot}^2 = C_{\text{adyacente}}^2 + C_{\text{opuesto}}^2$$

$$C_{\text{opuesto}}^2 = 20,61^2 - 20^2$$

$$C_{\text{opuesto}} = a = 4,97 \text{ cm}$$



$$\cos 14^\circ = 2,54 \text{ cm} / h$$

$$h = 2,54 \text{ cm} / \cos 14^\circ$$

$$h = 2,62 \text{ cm}$$

$$\text{Hipot}^2 = C_{\text{adyacente}}^2 + C_{\text{opuesto}}^2$$

$$C_{\text{opuesto}}^2 = 2,62^2 - 2,54^2$$

$$C_{\text{opuesto}} = a = 0,64 \text{ cm}$$

$$V_{\text{cono mayor}} = (\pi * r^2 * h) / 3 = (\pi * 20^2 * 4,97) / 3 = 2081 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{cono menor}} = (\pi * r^2 * h) / 3 = (\pi * 2,54^2 * 0,64) / 3 = 4,324 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{tronco cono}} = V_{\text{cono mayor}} - V_{\text{cono menor}} = 2076,676 \text{ cm}^3 = 2,076 \text{ L}$$

$$V_{\text{sedimentador}} = V_{\text{cilindro}} + V_{\text{tronco cono}}$$

$$V_{\text{sedimentador}} = 62,830 \text{ L} + 2,076 \text{ L}$$

$$V_{\text{sedimentador}} = \mathbf{64,906 \text{ L}}$$

El flujo en nuestro sedimentador es radial por su forma circular. Posee en su parte inferior una tubería de 2" y una llave de paso del mismo tamaño para extracción de los lodos que allí se depositan hacia los lechos de secado; además, tiene en la parte lateral dos tuberías de 1" para el trasvase del agua clarificada a los fotorreactores. Para saber la altura a donde ubicamos la tubería de descarga hacia los fotorreactores, calculamos la altura que ocupa en el cilindro los 20 L de agua que pasaría a los fotorreactores y le restamos de la altura del nivel de agua. Sobre esa altura se coloca la tubería que va hacia los reactores. (Figura 8)

Nuestro volumen de agua a tratar a escala piloto es de 50 L, el volumen de los sólidos sedimentables que calculamos según el análisis que realizamos en el cono Imhoff que se sedimentan en el fondo del tanque de sedimentación es el 12,5%, es decir, un volumen de 6,25 L, el volumen restante 43.750 L, usaremos 40 L para evaluar la eficiencia de los dos fotorreactores, y los 3,75 L los usamos para los análisis fisicoquímicos y microbiológicos iniciales.



Figura 8. Sedimentador primario Fuente: autor Técnica digital. Laboratorio de Biotecnología.

Universidad de Pamplona

✓ Lechos de secado de lodos

Los lechos de secado consisten en filtros poco profundos, llenos de arena y grava, con un sistema de drenaje por debajo para recolectar los lixiviados. Los lodos son descargados sobre la superficie para desaguar y deshidratarse. Este secado se basa en el drenaje de líquidos a través de la arena que actúa como filtro y la evaporación del agua presente en la superficie de los lodos, donde se deshidrata hasta los niveles que permiten la manipulación para disposición y uso final. El sistema propuesto se toma en el modelo como el diseño del sedimentador primario, con el mismo radio e inclinación, modificando solamente la altura. (Figura 9)

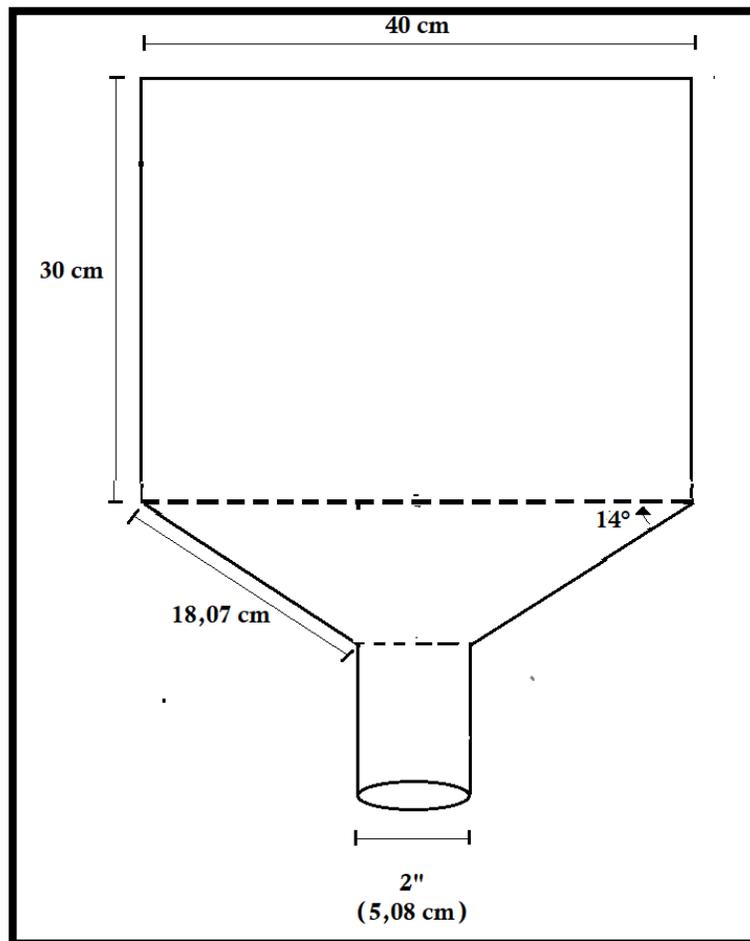


Figura 9. Diseño de los lechos de secado de lodo. Fuente: autor

Los lechos de secado de los lodos tiene una tubería de drenaje es de 2" de los lixiviados de los lechos con un sifón que no permite la caída de la grava hacia el tanque de lixiviados. Encima del drenaje, se colocaron dos capas de grava y una de arena lavada a fin de prevenir la obstrucción del lecho con las partículas finas. La capa inferior es de grava más gruesa (15 mm), la siguiente es con grava más fina (10 mm) y por último se usó una capa de arena lavada de (5 mm). Esta distribución ya había sido usada por Cofie (Cofie, Agbottah, Strauss, Esseku, & Montangero, 2006) donde colocaron una capa de 15 cm de grava gruesa (19 mm diámetro), seguido por una capa de 10 cm

de una grava más fina (10 mm). La tubería de 2" proveniente del sedimentador no cae directamente sobre la arena, cae sobre un pedazo de acrílico que permite que no se formen huecos sobre el lecho filtrante. (Figura 10)



Figura 10. Lechos de secado de lodos. Fuente: autor. Técnica digital. Laboratorio de Biotecnología. Universidad de Pamplona

El tiempo de secado de un lodo específico depende de varios factores y uno de los cuales es la resistencia al drenaje de agua. A medida que esta resistencia es mayor, los lodos se desaguan más despacio. Para poder retirar correctamente los lodos, deben ser suficientemente secos. Pescod, llevó a cabo experimentos con diferentes tipos de lodos y varias tecnologías de tratamiento, incluyendo lagunas y lechos de secado, y determinó que lodos con un contenido de sólidos mayor a un 25 % pueden ser extraídos (Pescod, 1971). En el lecho de secado se dejaron los lodos durante 8 días, luego se retiró manualmente y después se realizó el análisis del mismo.

Otra alternativa para la realización de los lechos de secado es la utilización de Geodren sobre una capa de antracita o grava, el geodren es un geotextil o tejido de polipropileno soportado por una base de polietileno de alta densidad. El Geotextil permite el paso del agua filtrando los materiales finos y evitando la formación de cavernas debido a la erosión. El geotextil permite que no se altere el material que se coloque por arriba del geodren

✓ Residuos de lechos de secado. (Figura 11).

Es un recipiente que contiene el agua del drenaje que pasa por el lecho filtrante. Está ubicado en la parte inferior de los lechos de secado.

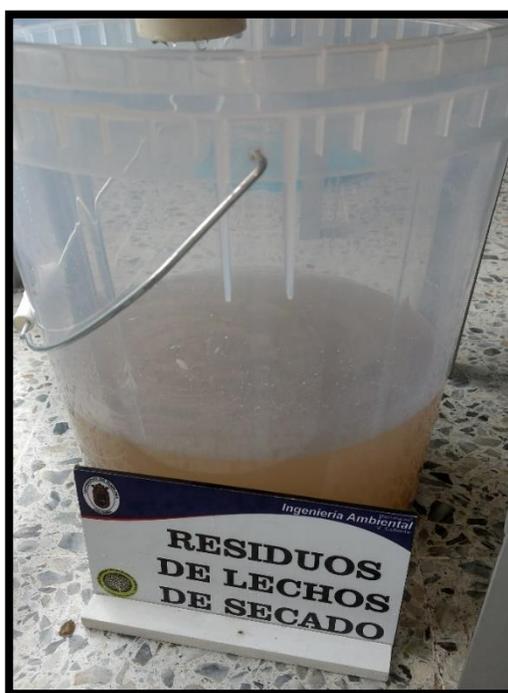


Figura 11. Residuos de lechos de secado.

Fuente: autor. Técnica digital. Laboratorio de

Biotechnología. Universidad de Pamplona

✓ Fotorreactor airlift (Figura 12)

Los reactores airlift están formados por un tubo vertical transparente. El aspensor se encuentra en la parte inferior de la columna y provee al reactor de pequeñas burbujas que tienen por función el mezclado del líquido y la transferencia de masa de CO_2 y la remoción de O_2 (Kumar, 2011). Los reactores airlift se diferencian de los de columnas de burbujeo, porque en ellos las corrientes de flujo ascendentes se separan físicamente de las descendentes. Para ello, los reactores airlift cuentan con varias estructuras bien definidas:

- ✓ Columna de flujo descendente (downcomer o downflow): sin burbujas; como su nombre lo indica, en esta parte se establece un flujo descendente debido a una mayor densidad aparente que en el riser.
- ✓ Columna de burbujeo (riser o upflow): guía las burbujas hacia el separador de gases. En ella, el flujo es ascendente.
- ✓ Separador de gases: ubicado en el centro del reactor, es el lugar donde ocurre la separación de las burbujas que llegan por el riser, este se une con el downcomer.
- ✓ Base: parte inferior del reactor, allí se unen, el riser y el downcomer. En esta parte se introducen las burbujas por el riser.
- ✓ Difusor de aire: proporciona el O_2 y mantiene la mezcla del reactor. En nuestro sistema está diseñado con acero inoxidable y con unos orificios de 0,2mm de diámetro distribuidos en la base, por donde fluye el O_2 .

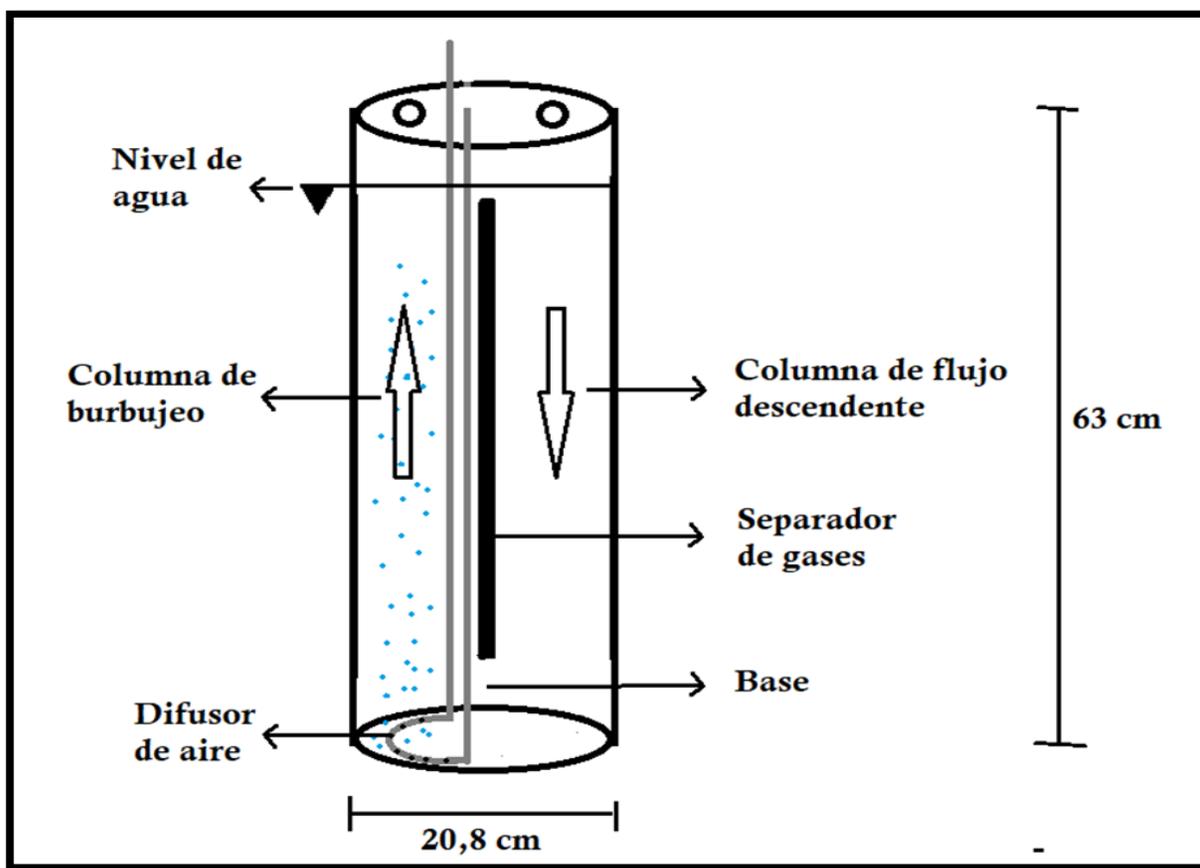


Figura 12. Diseño del fotorreactor airlift. Fuente: autor

En el diseño, se utilizó un reactor construido en el laboratorio del Centro de Biotecnología fabricado en PMMA (acrílico) de 5mm de espesor, diseñado con un diámetro de 20,8 cm, una altura de 63 cm, con capacidad nominal de 21,4 L, Estas dimensiones le otorgaron al modelo construido una relación altura/diámetro (h/D) de 3 como el usado por (Fernandez, 2013). El agua clarificada del sedimentador es llevada al fotorreactor, que se llena 2cm más arriba del separador de gases. En su parte inferior tiene una llave de 1" que permite el vaciado del mismo tanto del agua tratada como la biomasa. El volumen de trabajo en este fotorreactor es de 20L La figura 13 muestra el diseño de nuestro fotorreactor airlift.



Figura 13. Fotorreactor airlift. Fuente: autor. Técnica digital. Laboratorio de Biotecnología.

Universidad de Pamplona

✓ Fotobiorreactor laminar (Figura 14)

El fotorreactor laminar diseñado tiene el mismo principio de una columna de burbujeo. Se basa en una caja rectangular con una base en semicírculo diseñada para que se mantenga la turbulencia y el flujo másico dentro del mismo y no existan depósitos de biomasa en las uniones de las paredes. Para el uso eficiente de la luz solar, la cara más amplia se orienta hacia el sol para aumentar su eficiencia (Carvalho & Meireles, 2006). Se fabricó también con PMMA de 5 mm. En este fotorreactor, la agitación del reactor se realiza por burbujeo de aire. (Ramírez, Quiroz, & Jacob-Lopes, 2013). La fabricación con PMMA, permite una mejor trayectoria incidente de la luz en el

cultivo facilitando los ciclos de luz-oscuridad (12h-12h), aumentando la producción de biomasa y otros compuestos en las microalgas. (Degen, Uebele, Retze, Schmid-Staiger, & Trosch, 2001).

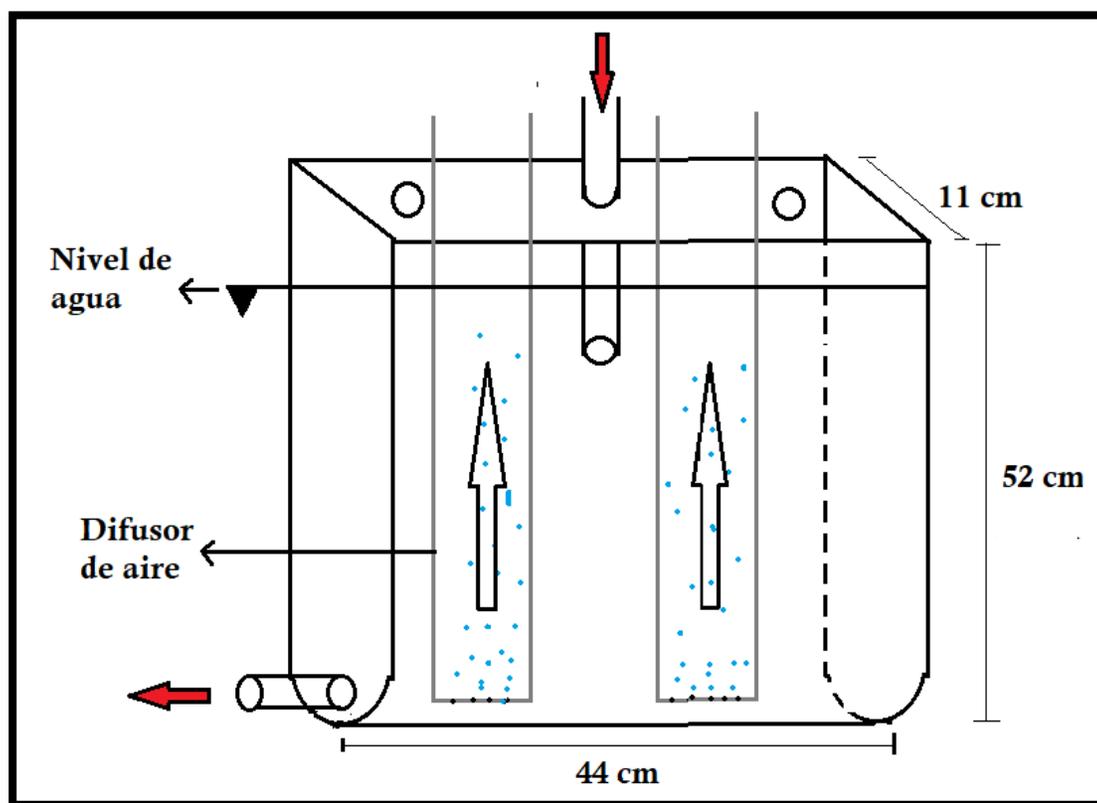


Figura 14. Fotorreactor laminar.

Fuente: autor

El fotorreactor laminar está fabricado en PMMA (acrílico) de 5mm de espesor, con un ancho de 11 cm, una altura de 52 cm, un largo de 44 cm con capacidad nominal de 25,2 L. En la parte inferior tiene una llave de 1" que permite el vaciado del mismo tanto del agua tratada como la biomasa. El volumen de trabajo del fotorreactor fue de 20L para poder comparar la eficiencia con respecto al airlift. Tiene 2 difusores de aire diseñados también con acero inoxidable como en el airlift, con orificios de 0,2mm de diámetro distribuidos en la base. La figura 15 muestra el diseño del fotorreactor laminar.



Figura 15. Fotorreactor laminar. Fuente: autor. Técnica digital. Laboratorio de Biotecnología. Universidad de Pamplona

3.3.3 FASE III.

Una vez conocidas las condiciones óptimas de operación en la Fase II empleando como medio de cultivo el agua residual procedente de la sedimentación por gravedad a escala laboratorio y los resultados de la evaluación del potencial de Biorremediación de las microalgas estudiadas, en el cual se evidenció que CCBio1 (*Chlorella sp*) y CCBio2 (*Scenedesmus sp*) lograron las mejores

remociones, se evaluó el sistema biológico propuesto para el tratamiento de las aguas residuales de la piscifactoría en estudio, en dos fotoreactores (Laminar y Air lift) evaluando la eficiencia en la remoción de contaminantes y el desarrollo de la biomasa microalgal. Para el análisis de la información se aplicó estadística descriptiva utilizando valores promedio de los experimentos por triplicado de las variables: Nitratos, fosfatos, amonio, DQO, Bacterias Coliformes Totales, bacterias Coliformes Fecales y Nitrógeno. Se seleccionó el mejor fotorreactor, para proponer a los propietarios de la piscifactoría a escala real

3.3.3.1 Montaje del sistema de tratamiento biológico

Como primer paso para el montaje del sistema, se procedió a armar la estructura metálica fabricada con ángulo de 1-1/2" de hierro, que tiene una altura máxima de 2,1m. En la parte alta de la estructura se ubicó el tanque de alimentación y se dispuso de esta forma para aprovechar la acción de la gravedad (Figura 16)



Figura 16. Armado de la estructura del sistema.

Fuente: Autor. Técnica digital.

Laboratorio de Biotecnología. Universidad de Pamplona

Se realizó el lavado de los componentes del sistema (sedimentador primario, fotorreactores, difusores de aire, mangueras, etc.) con una solución de detergente, frotando vigorosamente, y enjuagamos con agua. Después se realizó la desinfección de los componentes con una solución de hipoclorito de sodio al 0,5% y se enjuagó con abundante agua, para evitar interferencias o alteraciones en los procesos biológicos. Al finalizar el lavado se enjuagó con agua destilada. (Figura 17)



Figura 17. Limpieza de los equipos a utilizar. Fuente: Autor. Técnica digital. Laboratorio de Biotecnología. Universidad de Pamplona

Se realizó el montaje de los componentes del sistema en la estructura metálica, se adecuó la tubería y las llaves necesarias para el funcionamiento del mismo. (Figura 18)



Figura 18. Distribución final de los componentes en el sistema. Fuente: autor. Técnica digital. Laboratorio de Biotecnología. Universidad de Pamplona

Después de las adecuaciones que se le realizaron al sistema, antes de ponerlo en marcha se realizó una prueba hidráulica, esta prueba consiste en colocar determinada cantidad de agua para que pase por todas las tuberías y muestre posibles fugas en el sistema. Al sistema se le adicionaron 60 litros de agua destilada en el tanque alimentador. Se probaron llaves y fugas en la tubería del alimentador. Por gravedad al abrir la llave del alimentador se llenó el sedimentador primario. Se probaron fugas en la tubería que va hacia los fotorreactores y en la que va a los lechos de secado. Se realizamos las pruebas a la llave para la evacuación de lodos, luego se realizó el llenado de los fotorreactores y las pruebas a las llaves de descarga del efluente tratado y se evacuo el agua del sistema. (Figura 19)



Figura 19. Prueba hidráulica del sistema. Fuente: autor. Técnica digital. Laboratorio de Biotecnología. Universidad de Pamplona

3.3.3.2 *Arranque y operación del sistema de tratamiento*

Se llenó el tanque alimentador con 50L de agua residual de la industria piscícola, se abrió la llave que va hacia el sedimentador primario para empezar la primera parte del tratamiento que consiste en la eliminación de la mayor cantidad de sólidos sedimentables. (Figura 20)



Figura 20. Carga del tanque de alimentación. Fuente: autor. Técnica digital. Laboratorio de Biotecnología. Universidad de Pamplona

Se realizó el llenado del sedimentador primario, se dejó sedimentar los sólidos durante 3 h; este tiempo se calculó en el experimento de Biorremediación y se encuentra dentro de los rangos planteados por bibliografía, que lo estipula entre 2-6 horas. ((RAS, 2000) (OPS/CEPIS, 2005)). Se observó cómo los sólidos más pesados se sedimentan y los que quedan flotando en la parte superior del mismo, se recogen cuidadosamente con un filtro. La figura 21 muestra el estado inicial y final del sedimentador.



Figura 21. Sedimentador primario con un tiempo de retención de 0, 1.5 y 3 h. Fuente: autor.

Técnica digital. Laboratorio de Biotecnología. Universidad de Pamplona

Se realizó el vaciado del agua clarificada hacia los fotorreactores airlift y laminar, ajustando el volumen de cada uno de ellos hasta 20 L. Se realizó el calentamiento de la muestra de agua residual a 72°C durante 1 minuto con la ayuda de una resistencia comercial para eliminar la presencia de microorganismos indeseables como los protozoos que aparecieron en el experimento de Biorremediación. (Uribarren B., 2016). Después de esto, se dejó aclimatar el agua a temperatura ambiente (20°C) para la inoculación de las microalgas a los fotorreactores. (Figura 22)

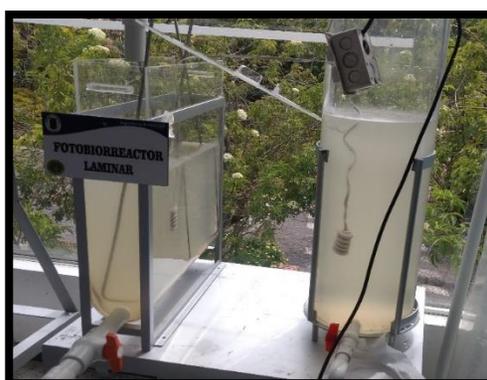


Figura 22. Llenado de los fotorreactores con el agua tratada en el sedimentador Fuente: autor.

Técnica digital. Laboratorio de Biotecnología. Universidad de Pamplona

Se adicionaron 2000 mL del consorcio de microalgas CcBIO1-CcBio2, manteniendo la relación 1/10 v/v usada en el experimento de Biorremediación, se ajustaron las mangueras plásticas a los difusores de aire de acero y se conectaron las bombas de acuario al sistema. La temperatura de operación fue de 20°C, el flujo de aire de 1L/ m y una DFF de 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con fotoperiodo de 12-12. Una vez efectuados de manera correcta los pasos para la puesta en marcha de los fotorreactores, se monitorearon diversos parámetros, como son los Nitratos, fosfatos, amonio, DQO, Bacterias Coliformes Totales, Bacterias Coliformes Fecales; y Nitrógeno en la biomasa; durante los 16 días. (Figura 23)

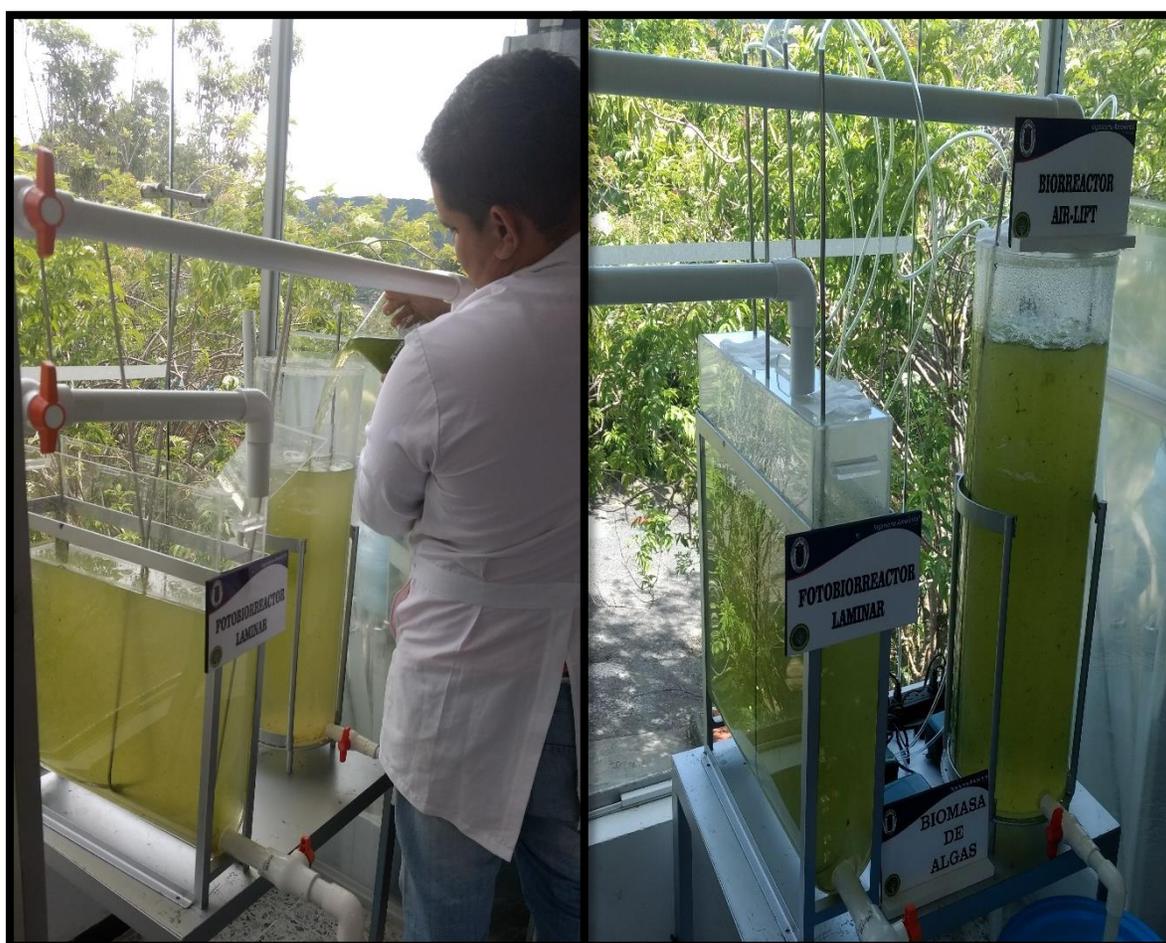


Figura 23. Arranque de los fotorreactores.

Fuente: autor. Técnica digital. Laboratorio de

Biocología. Universidad de Pamplona

Por otra parte, se vaciaron los lodos sedimentados sobre los lechos de secado, dejando que el agua drenara sobre el filtro de arena y grava del lecho y se recogió para descartar. El lodo residual se secó durante 8 días como se había planteado anteriormente. (Figura 24)



Figura 24. Lodo residual del sedimentador primario en los lechos de secado. Fuente: autor.

Técnica digital. Laboratorio de Biotecnología. Universidad de Pamplona

La figura 25 muestra de manera explícita el proceso del sistema biológico que se implementó; se muestran las piezas del sistema de tratamiento, los flujos del sistema, los productos esperados y los usos de los mismos.

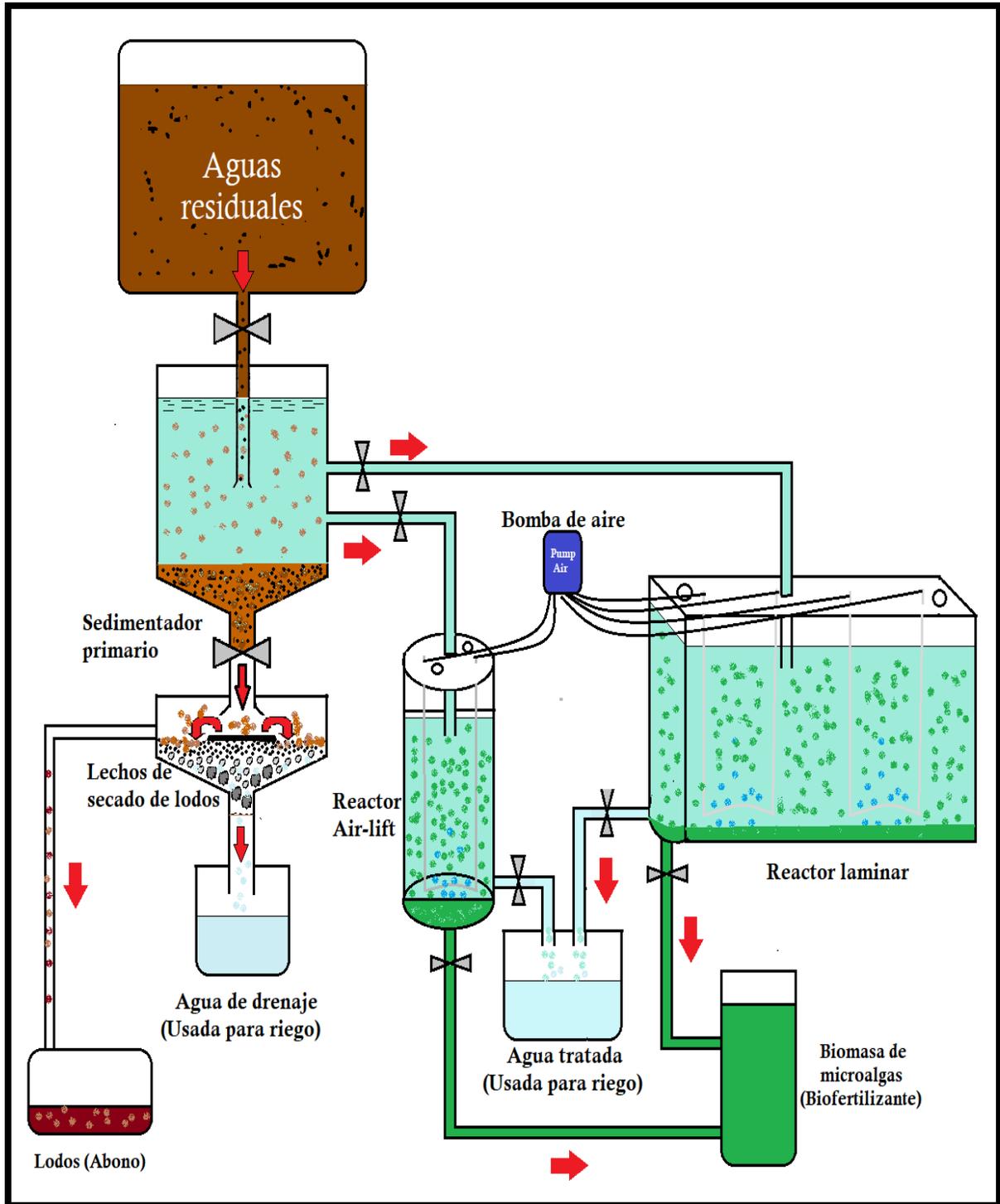


Figura 25. Esquema del sistema biológico a implementar. Fuente: Autor

A continuación en la figura 26 se presenta el sistema de tratamiento biológico desarrollado a escala piloto funcionando, adaptado a las posibilidades y requerimientos, que permitió evaluar el consorcio de microalgas CcBio1-CcBio2 en la remoción de contaminantes de aguas de la industria piscícola.



Figura 26. Tratamiento biológico para efluentes de la industria acuícola. Fuente: autor.

3.3.4 *Análisis estadístico*

Para el análisis de la información se aplicó estadística descriptiva utilizando valores promedio de los experimentos por triplicado de las variables: nitratos, fosfatos, amonio, DQO, Bacterias Coliformes Totales, Bacterias Coliformes Fecales, y Nitrógeno.

4. RESULTADOS Y ANALISIS

4.1 FASE I.

Análisis de calidad del agua

El monitoreo cuidadoso de los parámetros de calidad del agua es importante para comprender las interacciones entre parámetros y efectos tanto en el desarrollo del cultivo como en el medio ambiente. Cada parámetro de agua por sí mismo puede no decir mucho, pero varios parámetros juntos pueden revelar los procesos dinámicos que se llevan a cabo en el proceso. Los registros de calidad de agua permitieron notar cambios y tomar decisiones rápidas para que las acciones correctivas se realizaran rápidamente

En un cuerpo de agua se produce y a la vez se consume oxígeno. La producción de oxígeno está relacionada con la fotosíntesis y la turbulencia mientras el consumo dependerá de la respiración, descomposición de sustancias orgánicas y otras reacciones químicas. (Goyenola, 2007). A partir de este concepto se analizaron los resultados del Oxígeno Disuelto que mostraron la mayor concentración en la entrada del proceso, característico de la turbulencia con la que baja el agua por el Rio Comagieta que surte el agua del proceso (9,85 mg/l) y como bajan los valores en los tanques de crianza (0,44 mg/l) ya que el oxígeno es consumido por los peces. Y además, como se mantienen la baja concentración del mismo en la Laguna (0,357 mg/l), donde se encuentra un incremento de los nutrientes (materia orgánica, fosfatos y nitratos) que favorece el crecimiento de las microalgas presentes y consecuentemente la eutrofización de la misma.

Al realizar los monitoreos se observó que el porcentaje de oxígeno que se maneja en los tanques en algunos casos, cae a niveles por debajo de los necesarios para la vida de los peces, causando la muerte de estos por hipoxia. Además se ha comprobado que no aceptan el alimento cuando se presentan niveles bajos de oxígeno, lo cual conlleva a la pérdida de este insumo, afectando el crecimiento y la tasa de conversión alimenticia. (Rodríguez, 2001)

La temperatura promedio del proceso se mantuvo constante antes, durante y después proceso, variando un poco en la laguna, influenciados por la relación de la intensidad de la radiación con la profundidad del agua (las capas superiores se calientan más que las capas de agua profunda) La temperatura al igual que el oxígeno, disminuye a medida que aumenta la profundidad. (Chang, 2009)

La conductividad depende de la actividad de los tipos de iones disueltos y de la temperatura a la que se realiza la medida. (DIGESA, 2007) El agua pura tiene muy poca conductividad como lo muestran los valores del agua que entra al proceso ($38 \mu\text{S}/\text{cm}$), por lo que la medida de la conductividad del agua en los tanques de crianza ($146,5 \mu\text{S}/\text{cm}$) da una idea de los sólidos disueltos en la misma, como consecuencia de los restos de alimento y las heces de los peces. A diferencia de la temperatura y el oxígeno, la conductividad eléctrica es directamente proporcional a la profundidad; a medida que la profundidad de la columna de agua aumenta, también aumentan los valores de la conductividad, sabiendo que el valor en la parte superior de la laguna es de $83,5 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Los cuerpos de agua naturales ya sean lénticos o lóticos presentan una mínima cantidad de nutrientes como sulfatos, nitratos y fosfatos. (López, Salas, & Gómez, 2008) Estos niveles de

nutrientes tienden a incrementarse o disminuir dependiendo de la afectación que estén recibiendo como lo muestran las altas concentraciones de estos nutrientes en los tanques de crianza y la laguna, debido al alimento no consumido, las heces de los peces, la mortalidad y el residuo de diferentes compuestos de los tanques de crianza y en la laguna que permiten que estos macronutrientes actúen en la eutrofización de los cuerpos de agua. (Claros, 2012)

La piscicultura tiene un impacto negativo sobre el ecosistema lagunar, entre otras cosas por la acumulación de materia orgánica sobre los fondos, procedente de las excretas, materia orgánica muerta y la fracción de alimento no consumido. (Buschmann, 2001). El aumento de materia orgánica en los fondos produce hipoxia y anoxia que conlleva a la disminución de la diversidad de las especies bentónicas y la predominancia de otras más tolerantes. (Cornell & Whoriskey, 1993)

En cuanto a los análisis bacteriológicos del agua, se encontraron concentraciones elevadas en los tanques de crianza, siendo los mayores 55000 UFC/ml de Coliformes totales y 16000 UFC/ml de Coliformes fecales; en la laguna se registró solamente la presencia de Coliformes totales con una concentración menores a 16000 UFC/ml; no se evidencio crecimiento de Coliformes fecales en la laguna. Existen evidencias de que estas bacterias pueden transferir su información genética hacia la microbiota nativa (Arana, Justo, Muela, Pocino, & Barcina, 1997) y hacia patógenos obligados de peces como *Aeromonas salmonicida* (Marcinek & Wirth, 1998). Además, su presencia interfiere con algunos mecanismos de defensa de peces (Austin & Allen-Austin, 1985), pudiendo representar un riesgo sanitario potencial para la fauna íctica, puesto que existen algunas Enterobacterias que si bien no suelen afectar, su alta concentración en la piel, los tejidos y algunos órganos, pueden provocar un aumento en la susceptibilidad a infecciones provocadas por patógenos obligados. (Sugita & Shibuya, 1996)

4.2 FASE II

4.2.1 Aislamiento de Microalgas

Se aislaron cuatro cepas de algas: CCBio1, CCBio2, CCBio3, CCBio4 y CCBio5. Se trabajó con las cepas CCBio1 correspondiente a *Chlorella sp* y CCBio2 correspondiente a *Scenedesmus sp*. (Figuras 27 y 28). Las cepas CCBio3, CCBio4 y CCBio5 se encuentran en proceso de identificación (Parra, 2006). Se utilizó adicionalmente una cepa de *Arthrospira sp* suministrada por el cepario de Microalgas del Laboratorio de Biotecnología. Las microalgas aisladas e identificadas coinciden con los trabajos realizados en humedales de alta montaña por (TG Martín 2017; Rodríguez, 2012).

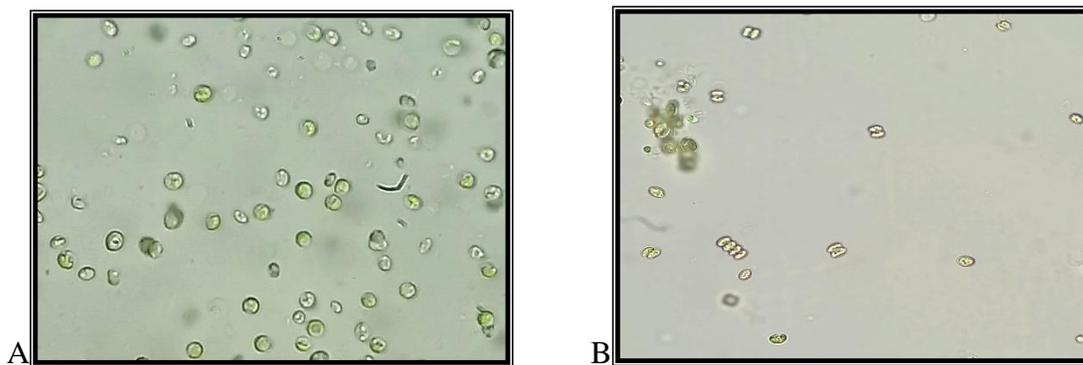


Figura 27. A. La cepa CCBio1 correspondiente a *Chlorella sp* y B. CCBio2 correspondiente a *Scenedesmus sp*. Fuente: Roa Parra A.L., Técnica digital. Laboratorio de Biotecnologías.

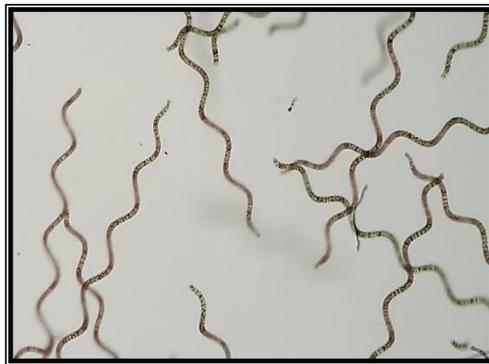


Figura 28. Cepa de *Arthrospira sp.* Fuente: Roa Parra A.L., Técnica digital. Laboratorio de Biotecnología. Universidad de Pamplona

A continuación se presentan las características de las cepas aisladas de *Chlorella sp.*, *Scenedesmus sp.*; y *Arthrospira sp.*

✓ *Chlorella sp*

Su taxonomía es la siguiente: Reino: Protista, División: Chlorophyta, Clase: Chlorophyceae, Orden: Chlorococcales, Familia: Oocystaceae, Género: *Chlorella sp.* Es una microalga unicelular de color verde, de forma esférica, con un diámetro que está entre 100 y 1000 veces menor a 1 milímetro. El color verde lo obtiene gracias a los cloroplastos que son las estructuras encargadas de hacer la fotosíntesis, no presenta flagelo y en la mayoría de veces se encuentra en los cuerpos de agua dulce; se reproduce de forma acelerada y de forma asexual (Infante, Angulo, Zárate, Barrios, & Zapata, 2012)

Este género ha sido aplicado al tratamiento biológico de aguas residuales, probando su efectividad en la remoción de nitrógeno, fósforo, demanda química de oxígeno y metales. Su uso

en aplicaciones de Biorremediación ha sido bastante amplio, en forma suspendida o inmovilizada, como cepa pura o en asociación con otros microorganismos no fotosintéticos (Garza, Almaguer, Rivera, & Loredó, 2010)

✓ *Scenedesmus* sp

La taxonomía es la siguiente: Reino: Protista, División: Chlorophyta, Clase: Chlorophyceae, Orden: Sphaeropleales, Familia: Scenedesmaceae, Genero: *Scenedesmus* sp. Está constituida por algas verdes que se alinean en filas cortas de 4, 8 o 16 células, formando una hilera, otras veces alternando construyendo un diminuto zigzag. Se trata de un grupo representado por más de cien especies, todas ellas bastante comunes en el plancton de las aguas dulces. Las células centrales de las colonias de *Scenedesmus* sp suelen ser de lados rectos mientras que con frecuencia, las situadas en los extremos, se curvan ligeramente para adoptar una forma de media luna, que muchas veces remata en dos apéndices largos como una espina. (Ruiz Becerra, 2016)

Scenedesmus sp resiste muy bien la contaminación y por este motivo se emplea en algunas plantas depuradoras, si se desarrolla masivamente puede proporcionar el oxígeno que necesitan las bacterias descomponedoras que viven en el agua y así acelera el proceso de depuración. Según el perfil de aminoácidos obtenido para la microalga *Scenedesmus* sp, se encuentra que ésta tiene aplicación potencial en la industria de alimentos balanceados para animales; la elevada capacidad de crecimiento de la microalga permite su uso como fuente de alimento en acuicultura, se usa para enriquecer piensos, tanto para acuicultura como para las industrias cárnicas, que se benefician de las propiedades de los carotenoides para mejorar el color de la carne. (Ramos Suarez, 2014)

✓ *Arthrospira* sp.

Se trata de una cianobacteria, incluida dentro la Clase de las denominadas Cianofitas o Cianobacterias, de carácter multicelular, cuyas células cilíndricas tienen un ancho de 3 a 12 milimicrones, alcanzando a veces hasta 16. Sus filamentos presentan un esquema en forma de hélice abierta y llegan a medir entre 100 y 200 milimicrones. Las condiciones de esta hélice y sus medidas dependerán de las condiciones ambientales y del crecimiento del alga.

Al ser rica en aminoácidos, proteínas, carbohidratos, ácidos grasos omega, vitaminas, minerales y otros nutrientes, es muy importante su uso como suplemento alimenticio, ya sea en polvo, encapsulado, en tabletas, pastas para sopas, salsas, barras de cereales, bebidas de frutas u otros. Varias de las propiedades que posee se deben a algunos de sus constituyentes, en especial, los ácidos grasos omega 3 y 6, el beta-caroteno, el alfa-tocoferol, la ficocianina, compuestos fenólicos y un compuesto últimamente descubierto, denominado Ca-Spirulan (Ca-SP) que posee actividad antiviral (Chamorro, y otros, 2002)

4.2.2 Preparación de inóculos

Los inóculos fueron preparados en caldo específico modificado con aguas residuales acuícolas 50% v/v, alcanzando las siguientes concentraciones iniciales: *Chlorella* sp 120.000 c/ml; *Scenedesmus* sp 98.000 c/ml; *Arthrospira* sp 100.000 c/ml.

4.2.3 Evaluación de la Biorremediación

La tabla 2 muestra la actividad de *Chlorella* sp en la remoción de Nitratos y fosfatos del agua residual acuícola.

<i>Chlorella</i> sp (CCBio1)				
Fecha	0 días	5 días	12 días	18 días
Nitratos (mg/l)	215	170	125	248
Fosfatos (mg/l)	1,27	4,3	4,14	3,32
Recuento (cl/ml)	0	295000	1925000	1355000

Tabla 2. Actividad de *Chlorella* sp en la remoción de Nitratos y fosfatos de agua residual

Transcurridos 5 días de la incubación de los nutrientes y la biomasa se obtuvo una eficiencia de remoción del 21% y para fosfatos se observa un aumento de concentración de fosfatos que se deduce por el tiempo de adaptación de la cepa al medio, no hubo degradación de los mismos. Transcurridos 12 días, se obtuvo una eficiencia de remoción del 41,86% de Nitratos y para fosfatos se mantuvo la misma desde el día 5. Transcurridos 18 días se obtiene un aumento de la concentración celular y para fosfatos se mantiene un poco más baja que la del día 5; el aumento de la concentración de nitratos se debe a que la microalga ya entro a su fase de muerte como lo muestra la disminución de la concentración celular de la misma y empieza la acción microbiana de otros microorganismos

La tabla 3 muestra la actividad de *Scenedesmus* sp en la remoción de Nitratos y fosfatos del agua residual acuícola.

<i>Scenedesmus sp</i> (CCBio2)				
Fecha	0 días	5 días	12 días	18 días
Nitratos (mg/l)	215	220	180	304
Fosfatos (mg/l)	1,27	0,72	0,65	0,39
Recuento (cl/ml)	0	565000	2830000	1250000

Tabla 3. Actividad de *Scenedesmus sp* en la remoción Nitratos y fosfatos de agua residual

Transcurridos 5 días de la incubación de los nutrientes y la biomasa se obtiene que la concentración inicial de nitratos se mantuvo y para fosfatos se observa una eficiencia de remoción del 43,3%. Transcurridos 12 días se obtiene una eficiencia de remoción de nitratos de 16,27% y para fosfatos de 48,8%. Transcurridos 18 días se obtiene un aumento de la concentración de nitratos, debido a que la microalga ya entro a su fase de muerte como lo muestra la disminución de la concentración celular de la misma y empieza la acción microbiana de otros microorganismos. Mientras que para fosfatos se observa una eficiencia de remoción del 69,29%

La tabla 4 muestra la actividad de *Arthrospira sp* en la remoción de Nitratos y fosfatos del agua residual acuícola.

<i>Arthrospira sp</i>				
Fecha	0 días	5 días	12 días	18 días
Nitratos (mg/l)	215	190	342,5	288
Fosfatos (mg/l)	1,27	2,24	2,48	1,55
Recuento (cl/ml)	0	20000	17500	20000

Tabla 4. Actividad de *Arthrospira sp* en la remoción de Nitratos y fosfatos de agua residual

Transcurridos 5 días de incubación se obtiene una eficiencia de remoción del 11,6 % de nitratos y para fosfatos se observa un aumento de concentración de fosfatos posiblemente por el tiempo de adaptación de la cepa al medio; no hubo degradación de los mismos como lo sucedido con *Chlorella* sp. Transcurridos 12 días, se registra un aumento de la concentración de nitratos y para fosfatos un aumento levemente. Transcurridos 18 días se obtiene una remoción leve de 15,9% y para fosfatos una eficiencia de remoción de 37,5%.

La mejor remoción de nitratos se dio por parte de CCBio1 (*Chlorella* sp) a los doce días 42%, seguida de 16,3% de CCBio2 (*Scenedesmus* sp), día en el cual se obtuvieron los mejores recuentos celulares (CCBio1: 2E6 c/ml; CCBio2: 3E6 c/ml); con respecto a los fosfatos se observaron resultados más favorables con CCBio2 con un valor de 69,3% en el día 18, seguido de 16% por parte de CCBio1. Se registró una mayor remoción de DQO 82,3% por CCBio1, seguido de 63,6% por CCBio2. No se observó remoción de nitratos, fosfatos y DQO por *Arthrospira* sp en coherencia con la muerte celular registrada.

Roa y Cañizares 2012 utilizando *Scenedesmus incrassatulus* inmovilizado en un medio sintético enriquecido con reactores airlift y condiciones ambientales similares registraron mejores remociones de 60% de nitratos y 47% de fosfatos a los 8 días, sugiriendo la posibilidad de evaluar algún método de inmovilización para el tratamiento de aguas residuales acuícolas. (Roa Parra & Cañizares Villanueva, 2012)

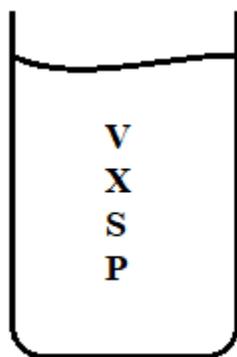
El uso de las microalgas *Chlorella* sp. y *Scenedesmus* sp., es efectivo para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria pesquera; esta última en especial para la remoción de fosfatos y nitrógeno y más modestamente para materia orgánica. Además, *Scenedesmus* sp. puede

generar también los nutrientes necesarios para la producción de biomasa algal. (Romero & Fresneda, 2001)

Tafur & Estrada (2015), también llevo a cabo una investigación en la ciudad de Barrancabermeja (Colombia), cuyo objetivo fue determinar cuál fue el efecto del cultivo de la microalga *Chlorella* sp. como método de tratamiento in vitro de aguas residuales, con el fin de remover nitratos y fosfatos. (Tafur, 2015)

4.2.4 Balances de materia y energía para Biorreactor Discontinuo con Aireación

Los reactores biológicos que usamos en nuestros experimentos son reactores discontinuos en los que el agua residual de la industria acuicola se mezcla con un consorcio biológico de microalgas en un medio aireado, que permite mantener el mezclado en el proceso. El proceso combina en un mismo tanque reacción, airación y clarificación pues terminado el proceso separamos la biomasa del sustrato tratado. El empleo de un único tanque reduce sustancialmente la inversión necesaria. A continuación se presenta las ecuaciones de materia y energía para el biorreactor:



ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE DE MATERIA

$$\frac{dM}{dt} = M_i - M_o + R_g - R_c \quad \longrightarrow \quad \text{Ecuación I}$$

M_i: Masa entrada
M_o: Masa salida
R_g: Masa generada
R_c: Masa consumida

Para un Biorreactor discontinuo M_i y $M_o = 0$, entonces la Ecuación I queda:

$$\frac{dM}{dt} = R_g - R_c \quad \longrightarrow \quad \text{Ecuación II}$$

R_g : Velocidad volumetrica de crecimiento

R_c : Velocidad volumetrica de muerte celular

- Balance de Biomasa (X)

Sabiendo que:

$$M = X \cdot V$$

$$R_g = \mu \cdot X \cdot V$$

$$R_c = K_d \cdot X \cdot V$$

Reemplazamos en la Ecuación II, y nos queda:

$$\frac{d(X \cdot V)}{dt} = \mu \cdot X \cdot V - K_d \cdot X \cdot V$$

$V =$ Volumen constante

$$V \frac{dX}{dt} = V(\mu \cdot X - K_d \cdot X)$$

$$\frac{dX}{dt} = (\mu \cdot X - K_d \cdot X)$$

$$\frac{dX}{dt} = X(\mu - K_d)$$

$$\frac{dX}{X} = (\mu - K_d) \cdot dt$$

$$\frac{dX}{X} = (\mu_{\max} - K_d) \cdot dt$$

$$t = \frac{1}{\mu - K_d} \cdot \ln \frac{X_f}{X_o}$$

$K_d \ll \mu_{\max}$ (No hay muerte celular, debido a que su crecimiento es exponencial hasta el día 12)

$$t = \frac{1}{\mu_{\max}} \cdot \ln \frac{X_f}{X_o}$$

$$X_f = X_o \cdot e^{\mu_{\max} \cdot t} \quad \longrightarrow \quad \text{Ecuación III}$$

- **Balance de Sustrato (S)**

Sabiendo que:

$$M = S \cdot V \qquad R_c = q_s \cdot X \cdot V \qquad M_i = M_o = R_g = 0$$

$$q_s = \left(\frac{\mu_{\max}}{Y_{xs}} + \frac{q_p}{Y_{ps}} + m_s \right)$$

Reemplazamos en la Ecuación I, y nos queda:

$$\frac{dM}{dt} = M_i - M_o + R_g - R_c$$

$$\frac{dM}{dt} = - R_c$$

$$\frac{d(S \cdot V)}{dt} = - \left(\frac{\mu_{\max}}{Y_{xs}} + \frac{q_p}{Y_{ps}} + m_s \right) X \cdot V$$

$$V \cdot \frac{ds}{dt} = - \left(\frac{\mu_{\max}}{Y_{xs}} + \frac{q_p}{Y_{ps}} + m_s \right) X \cdot V$$

$$\frac{ds}{dt} = - \left(\frac{\mu_{\max}}{Y_{xs}} + \frac{q_p}{Y_{ps}} + m_s \right) X_o \cdot e^{\mu_{\max} \cdot t}$$

Considerando $\left(\frac{\mu_{\max}}{Y_{xs}} + \frac{q_p}{Y_{ps}} + m_s \right)$ es constante tenemos:

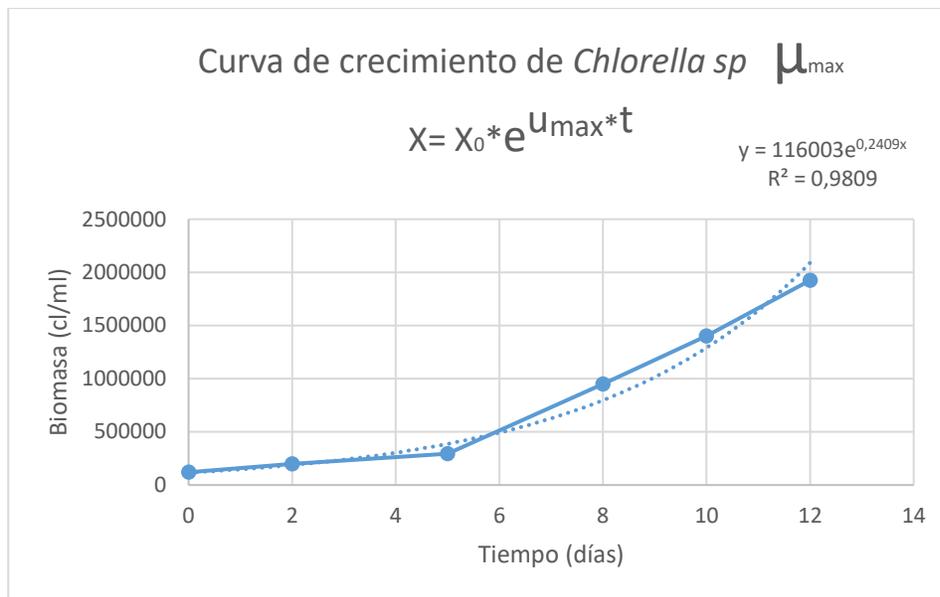
$$t = \frac{1}{\mu_{\max}} \cdot \ln \left[1 + \frac{S_o - S_f}{\left(\frac{1}{Y_{xs}} + \frac{q_p}{\mu_{\max} \cdot Y_{ps}} + \frac{m_s}{\mu_{\max}} \right) X_o} \right] \rightarrow \text{Ecuación IV}$$

Asumiendo que la producción esta directamente asociada al metabolismo energético y $m_s = 0$, tenemos:

$$t = \frac{1}{\mu_{\max}} \cdot \ln \left[1 + \frac{Y_{xs}}{X_o} \cdot (S_o - S_f) \right] \rightarrow \text{Ecuación V}$$

- **Grafica de crecimiento celular:**

Con los datos obtenidos del experimento de biorremediación, donde se obtuvo un buen crecimiento y remoción de contaminantes de la microalga *Chlorella sp* y de *Scenedesmus sp*; realizamos la grafica de recuento celular VS tiempo, tanto para *Chlorella sp*, para ambas cepas, para realizar la curva de crecimiento, y obtener la ecuación III.



$$X_f = 116003e^{0,2409 \cdot t}$$

Calculamos la Biomasa final teórica para un tiempo $t=12$ días, que es el día hasta donde hubo crecimiento celular en el fotorreactor de nuestro experimento.

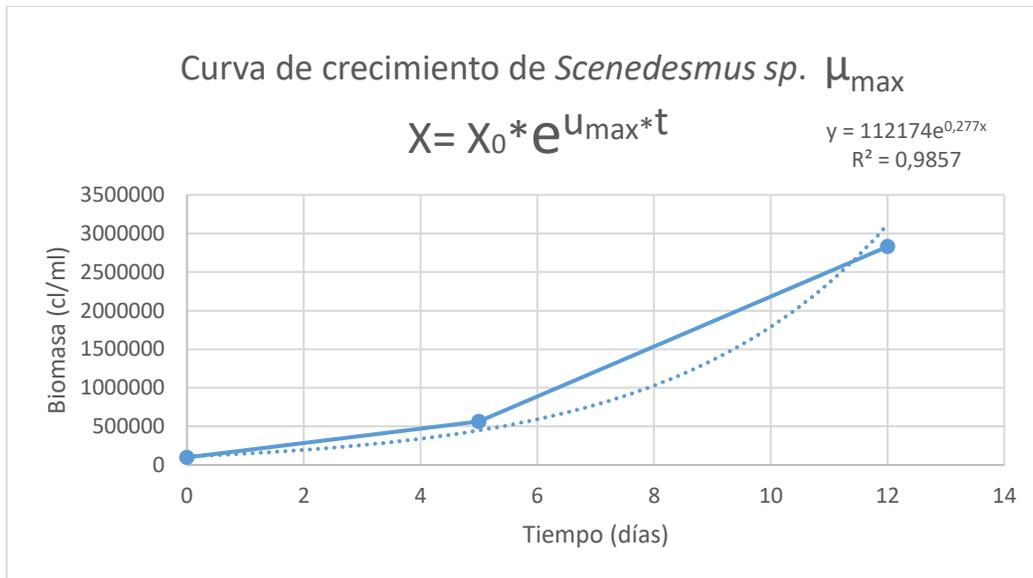
$$X_f = 116003e^{0,2409 \cdot (12)}$$

$$X_f = 2088948 \text{ cl/ml}$$

$$\text{Rendimiento para } Chlorella \text{ sp.} = \frac{\text{Biomasa final real del experimento}}{\text{Biomasa final teórica}} * 100$$

$$\text{Rendimiento para } Chlorella \text{ sp.} = \frac{1925000}{2088948} * 100$$

$$\text{Rendimiento para } Chlorella \text{ sp.} = 92,15\%$$



$$X_f = 112174e^{0,277 \cdot t}$$

Calculamos la Biomasa final teórica para un tiempo $t=12$ días, que es el día hasta donde hubo crecimiento celular en el fotorreactor de nuestro experimento.

$$X_f = 112174e^{0,277 \cdot (12)}$$

$$X_f = 3115208 \text{ cl/ml}$$

$$\text{Rendimiento para } \textit{Scenedesmus sp.} = \frac{\text{Biomasa final real del experimento}}{\text{Biomasa final teórica}} * 100$$

$$\text{Rendimiento para } \textit{Scenedesmus sp.} = \frac{2830000}{3115208} * 100$$

$$\text{Rendimiento para } \textit{Scenedesmus sp.} = 90,84\%$$

- **Balance de Energia**

$$- \Delta H_{rx} - M_v \cdot \Delta h_v - Q + W_s = 0$$

ΔH_{rx} : Calor de reacción

$M_v \cdot \Delta h_v$: Calor por liquido evaporado = 0

Q: Pérdida de calor en el biorreactor = 0

W_s : Potencia del agitador = 0

Para un sistema aeróbico el $\Delta H_{rx} = -460$ KJ/mol O_2 consumido

$$- \Delta H_{rx} = Q$$

Asumiendo la ley de los gases ideales

$P_{Pamplona} = 1,0007$ atm

$T_{Pamplona} = 15^\circ C$

Flujo de aire $V = 1L/ m$

$$n = \frac{P * V}{R * T}$$

$$n_{aire} = \frac{1,0007 * 1L/min}{0,082 * 288}$$

$$n_{aire} = 0,04237 \text{ mol aire/min}$$

$$\text{Moles de } O_2 = 0,04237 \frac{\text{mol aire}}{\text{min}} * 0,21 \frac{\text{mol } O_2}{\text{mol aire}}$$

$$\text{Moles de } O_2 = 8,8985 * 10^{-3} \text{ mol } O_2/\text{min}$$

$$Q = \Delta H_{rx}$$

$$Q = \frac{460 \text{ KJ}}{\text{Mol } O_2} * \frac{8,8985 * 10^{-3} \text{ mol } O_2}{\text{min}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} * \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} * 12 \text{ días}$$

$$Q = \Delta H_{rx} = 70732,4 \text{ KJ}$$

4.3 FASE III

4.3.1 Monitoreo de los fotorreactores airlift y laminar

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el monitoreo de los fotorreactores airlift y laminar, donde se evaluaron parámetros como Nitratos, fosfatos, amonio y DQO durante 16 días, tomando 3 muestras de agua por reactor cada 4 días para su análisis con la ayuda de los Tests Spectroquant® usados para análisis de las aguas residuales. Además muestra el porcentaje de remoción de Coliformes totales y Coliformes fecales para cada uno de los reactores. La tabla 5 muestra los porcentajes de remoción de contaminantes para el fotorreactor laminar y la tabla 6 muestra los porcentajes de remoción para el fotorreactor airlift.

REACTOR LAMINAR CONSORCIO CC BIO1-CC BIO2				
Fecha	4 días	8 días	12 días	16 días
% Remoción Nitratos	54,72	73,2	100	100
% Remoción Fosfatos	32,40	45,62	50,93	62,72
% Remoción Amonio	13,63	96,6	100	100
% Remoción DQO	18,64	71,89	90,7	94,05
% Remoción Coliformes totales	-	-	-	87,5
% Remoción Coliformes fecales	-	-	-	87,5

Tabla 5. Porcentajes de remoción de contaminantes para el fotorreactor laminar

REACTOR AIRLIFT CONSORCIO CCBIO1-CCBIO2				
Fecha	4 días	8 días	12 días	16 días
% Remoción Nitratos	28,15	64,83	100	100
% Remoción Fosfatos	56,36	57,97	96,82	100
% Remoción Amonio	12,38	97,2	98,4	99,69
% Remoción DQO	54,83	77,19	92,9	93,68
% Remoción Coliformes totales	-	-	-	87,5
% Remoción Coliformes fecales	-	-	-	62,5

Tabla 6. Porcentajes de remoción de contaminantes para el fotorreactor airlift

Evaluando los mejores porcentajes de remoción del consorcio de microalgas CcBIO1-CcBio2 con respecto al fotorreactor usado, podemos concluir que ambos reactores tuvieron una excelente remoción de nitratos con un porcentaje de 100%; la mejor remoción de fosfatos se obtuvo en el fotorreactor air-lift a los 16 días con un porcentaje de 100%; la mejor remoción de amonio se obtuvo en el fotorreactor laminar a los 16 días con un porcentaje de 100%; la mejor remoción de DQO se obtuvo en el fotorreactor laminar a los 16 días con un porcentaje de 94,05%; la mejor remoción de Coliformes totales se obtuvo en el fotorreactor laminar a los 16 días con un porcentaje de 87,5%; y la mejor remoción de Coliformes fecales se obtuvo en el fotorreactor laminar a los 16 días con un porcentaje de 87,5%. En conclusión, el reactor que obtuvo las mejores eficiencias en remoción de contaminantes es el fotorreactor laminar, con 4 de los 6 parámetros estudiados.

Las eficiencias de remoción de nitrógeno, obtenidas al final de este estudio, son similares a las reportadas para *Chlorella pyrenoidosa* y *Scenedesmus* sp. en agua residual doméstica proveniente de un proceso de tratamientos primario y secundario. (Tam & Wong, 1989) De igual forma se

presentó para *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus dimorphus* en agua residual agroindustrial (Gonzalez, Cañizares, & y Baena, 1997).

Este consorcio de las microalgas *Chlorella sp* y *Scenedesmus sp*, ya había sido utilizado para procesos de biorremediación de efluentes urbanos pretratados proveniente de la planta de tratamiento cloacal —La Viñita, Provincia de Catamarca, Argentina. Se obtuvieron resultados experimentales del proceso biorremediador del consorcio, donde se observó que disminuyó la concentración de DBO₅ en un 63,63 %, la de DQO en un 51,8 %, la de nitratos en un 38%. (Lucero, 2015)

El uso del consorcio de *Chlorella sp.* y *Scenedesmus sp.*, también fue evaluado en la remoción de nitrógeno, fósforo y DQO de aguas residuales urbanas de Maracaibo, Venezuela. Se evaluó el uso de *Chlorella sp.* y *Scenedesmus sp.*, para la remoción de N-NH₄⁺, PPO₄⁻³ y DQO de las aguas residuales del sistema de estabilización de la Universidad del Zulia, obteniendo una remoción del nitrógeno y el fosfato, entre 44,0% y 48,7%; y la DQO entre 54,8% y 55,8%, favoreciendo el uso potencial de estas microalgas para el tratamiento de aguas residuales urbanas. (Chacón, Andrade, Cárdenas, Araujo, & Morales, 2004)

En otro trabajo se evaluó el efecto de la geometría de dos fotobiorreactores anulares (airlift y columna de burbujeo) con iluminación interna sobre el crecimiento celular, remoción de nitrógeno y producción de lípidos de *Chlorella vulgaris*. Los resultados mostraron que con tasas de aireación similares como las que usamos en nuestro proyecto, el régimen hidrodinámico en ambos equipos fue apreciablemente diferente, presentándose mayor turbulencia en airlift. Las diferencias, se puede demostrar que mediante una ligera modificación a la geometría del Fotobiorreactor es posible

cambiar sustancialmente la agitación característica del sistema, y reducir el tiempo de cultivo necesario para alcanzar la máxima densidad celular y las menores tiempos de remoción de contaminantes. Esto probablemente a que las células consiguieron una pronta adaptación a las concentraciones de nitrógeno, sosteniendo su metabolismo y se obtuvo una remoción de nitrógeno alta (85-90%). (Robles-Heredia, Sacramento-Rivero, Ruiz-Marín, & Baz-Rodríguez, 2016)

4.3.2 Productos obtenidos a partir del desarrollo del proyecto

Con el desarrollo de este proyecto se obtuvo 3 productos a partir del tratamiento de las aguas residuales. La biomasa del consorcio de microalgas CcBio1-CcBio2, los lodos provenientes de los lechos de secado y el agua tratada en el sistema biológico. (Figura 29)



Figura 29. Productos obtenidos a partir de nuestro sistema de tratamiento. Fuente: autor.

✓ Lodos de secados pueden compostarse para producir una abono orgánico (Figura 30) La aplicación se emplea para mejorar las fitopropiedades del suelo, junto con el aporte de los tres principales elementos fertilizantes, N-P-K y el aporte de humedad y materia orgánica. (Canet, Pomares, Estela, & Tarazona, 1996). De esta manera, se asegura un incremento de la capacidad de adsorción e inmovilización parcial de los componentes del suelo, permitiendo que el sistema actúe con elevada capacidad de amortiguación, favoreciendo la asimilación de los nutrientes, incrementando la retención de agua, permitiendo un mayor enraizamiento y mejorando la textura y estructura del horizonte cultivable. (Reyes, Martinez, Sastre, Bigeriego, & Porcel, 1996) Esto conduce hacia una reducción de la escorrentía y, por lo tanto, de la erosión superficial. Por otro lado, al aplicar estos lodos se está minimizando, en un porcentaje elevado, el empleo de fertilizantes de origen químico, esto supone una reducción paralela en el aporte de nitrógeno mineral más fácilmente disponible y lixiviable, disminuyendo el riesgo de contaminación por nitratos en el perfil del suelo. Esto es posible debido a que el aporte de nitrógeno que se realiza aplicando lodo de los lechos de secado es de origen orgánico, el cual se irá liberando de manera progresiva a medida que se vaya mineralizando.



Figura 30. Abono orgánico a partir de los lodos residuales. Fuente: autor. Técnica digital.

✓ Biofertilizante a partir de la biomasa del consorcio de las microalgas CcBio1-CcBio2, las microalgas se separaron de las aguas residuales tratadas por decantación y las que quedaron re-suspendidas en el agua se separaron por filtración. El porcentaje de Nitrógeno que presento la biomasa del fotorreactor laminar fue del 1,9 %N, mientras que en el fotorreactor air-lift fue de 2,8 %N. (Figura 31) Los productos en base a microalgas pueden aumentar la resistencia de las plantas frente a estreses bióticos y abióticos. (Pérez García, Bashanm, & Puentem, 2011) Las microalgas pueden implementarse para convertir corrientes ricas en nutrientes procedentes de diferentes procesos en fertilizantes de liberación lenta con menos efectos adversos sobre el medio ambiente que la aplicación directa de estas corrientes o fertilizantes convencionales. Varios estudios demuestran que la aplicación de extractos de microalgas en los cultivos agrícolas conduce a un mayor crecimiento y rendimiento de la planta. (Perez-Garcia, De-Bashan, Hernandez, & Bashan, 2010). El aumento de contenido de antioxidantes, mayor actividad antioxidante, mejor desarrollo de las raíces, y mayor número y peso de frutos y semillas. (Olivieri, Salatino, & Marzocchella, 2014).



Figura 31. Biomasa del consorcio de microalgas CcBIO1-CcBio2. Fuente: autor. Técnica digital. Laboratorio de Biotecnología. Universidad de Pamplona

✓ Agua tratada en los fotorreactores airlift y laminar que puede ser utilizada como agua de riego (Figura 40); el uso de esta agua regenerada en la agricultura, hace parte de un proceso de planificación integral en la asignación de recursos hídricos para lograr una utilización del agua más eficiente y sostenible desde el punto de vista económico. Muchas regiones, están experimentando crecientes problemas de déficits hídricos. Esto se debe al crecimiento implacable de la demanda de agua frente a unos recursos hídricos estáticos o en disminución y a las periódicas sequías debidas a factores climáticos. El uso de agua regenerada puede ayudar a mitigar los efectos negativos de la escasez del agua a nivel local. No es la única opción para lograr un mejor equilibrio entre la oferta y la demanda, pero en muchos casos es una solución costo-eficaz, como lo demuestra el creciente número de sistemas de reutilización en diferentes partes del mundo. Una encuesta global (AQUAREC, 2006) ha demostrado que hasta esa fecha existían alrededor de 3 300 centros de regeneración de agua a nivel mundial. La agricultura es el usuario principal de agua regenerada y se utiliza para este propósito en alrededor de 50 países, en 10% de todas la tierras de regadío.

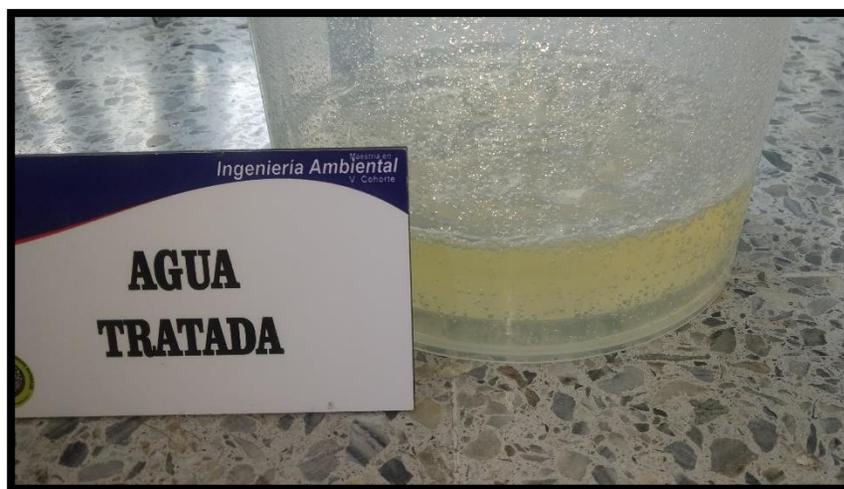


Figura 32. Agua residual tratada biológicamente en los fotorreactores. Fuente: autor. Técnica digital. Laboratorio de Biotecnología. Universidad de Pamplona

✓ Biomasa de microalgas *Chlorella sp.* y *Scenedesmus sp.* usada para preparación de alimento para peces de la granja piscícola El Rincón. La alimentación de los peces de la granja se realiza con una receta casera que preparan los cultivadores cuyos componentes son: palmiche (palma de aceite), sangre de res cocida (hasta volver harina), papa (cocida y molida), zanahoria (molida cruda), remolacha (molida cruda), mogolla. (Figura 33)



Figura 33. Ingredientes para la preparación de la comida casera de la trucha. Fuente: autor.

Finca El Rincón. Vereda Presidente.

Para la preparación del alimento se muele la papa, la zanahoria y la remolacha y se mezcla con la mogolla y la harina de sangre de res. Adicionalmente para que la trucha en su interior tenga una coloración rosada se le agrega a la mezcla un poco de pimienta. La biomasa de las microalgas que se obtuvo a escala laboratorio en el fotorreactor airlift puede suplir las necesidades proteicas de la sangre de res en la receta que los peces consumen. (Figura 34 y figura 35)



Figura 34. Receta casera tradicional con harina de sangre y con harina de microalgas. Fuente:

autor. Finca El Rincón. Vereda Presidente



Figura 35. Alimentación de los peces con el concentrado a base de microalgas. Fuente: autor.

Finca El Rincón. Vereda Presidente

El uso de algas en la acuicultura como aditivo ha recibido mucha atención debido a sus efectos positivos en el aumento de peso, el aumento de los triglicéridos y la deposición de proteínas en el músculo, lo cual mejora la resistencia a las enfermedades, disminuye la emanación de nitrógeno al medio ambiente, aumenta la digestibilidad de los peces, su actividad fisiológica, la tolerancia al hambre y calidad de su carne. Con este proyecto se deja abierta una posible investigación de Ingeniería de alimentos para evaluar el desarrollo de los cultivos de la Granja piscícola el Rincón cuando se incluya en la dieta de los peces la harina a base de microalgas

Los resultados alcanzados con el proyecto de investigación, permitirá considerar que la actividad piscícola que se desarrolla en la Finca El Rincón al implementar el tratamiento biológico a escala real, está enmarcada en el concepto de desarrollo sostenible porque:

- ✓ Busca la manera de que la actividad económica mejore el sistema ambiental porque se disminuye la contaminación de las fuentes hídricas, la pérdida del paisaje por fenómenos de eutrofización
- ✓ Asegura la actividad económica al mejorar la calidad de vida de todos y no de unos pocos, promoviendo la autosuficiencia regional, contribuyendo al desarrollo turístico de la región, mejorando la economía del pueblo e incentivando la visita de turistas, que favorece al gremio piscícola.
- ✓ Se usan los recursos eficientemente, como lo es el agua que se capta del río, y la satisfacción de la demanda de agua para los cultivos agrícolas de los alrededores.
- ✓ Promueve el máximo de reciclaje y reutilización de los lodos residuales y el agua tratada
- ✓ Pone la confianza en el desarrollo e implantación de tecnologías limpias como lo es la producción de alimento para peces con un mayor valor nutricional que el que se utiliza tradicionalmente

- ✓ Restaura los ecosistemas dañados, al disminuir la carga orgánica que es vertida en la Laguna Comagüeta
- ✓ Reconoce la importancia de la naturaleza para el bienestar humano; ésta siempre será fundamental en la vida del hombre pues forma parte de su sobrevivencia ya que se encuentra inmersa en aspectos fundamentales para el ser humano, como lo es el simple hecho de respirar. Cuida la naturaleza es parte de ti, reflexiona, y evita la contaminación del ecosistema.

Durante el desarrollo de esta investigación se presentaron recomendaciones y asesorías técnicas sobre algunas prácticas de manejo, para prevenir, corregir, mitigar o compensar los impactos ambientales negativos que se derivan de esta actividad acuícola en la Finca El Rincón. Dentro de las recomendaciones que se realizaron se encuentran el manejo adecuado de especies bovinas para la conservación de las propiedades del suelo, el plan de contingencia de la temporada de sequía y la preparación del alimento piscícola usando biomasa de microalgas como fuente de proteína. (Anexo 4). Estas recomendaciones, junto con la implementación del sistema de tratamiento biológico de los efluentes de la industria acuícola, contribuirá que la Finca El Rincón sea agro sostenible y pueda desarrollar el proyecto ecoturístico en la región.

Se presentaron las socializaciones del trabajo de investigación a nivel de eventos en el *V Seminario Internacional del Medio Ambiente (SIMA)* en el año 2015, organizado por la Universidad de Pamplona con la ponencia titulada: “*La Laguna Comagüeta reguladora del Cambio Climático*”, (ISBN: 978-958-58769-6-5, página 56-62); y en el *VI Congreso Internacional del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (CIMADES)* en el año 2018, organizado por la

Universidad con la ponencia (tipo poster) titulada: “*Biorremediación de nitratos y fosfatos de aguas residuales de la industria acuícola utilizando microalgas nativas*”, (ISBN: 978-958-96873-9-0, página 2287) . Ambas ponencias fueron realizadas por el autor del proyecto de Investigación. Además, se realizó la publicación de los resultados de la investigación a través de un artículo científico en la Revista Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas. (ISSN 01204211) con el título: “*Biorremediación de aguas residuales de la industria acuícola utilizando microalgas*”, aceptado para su publicación en el Vol 16(2) de 2018, que sera editado a finales del mes de Septiembre de 2018.

4.3.3 Propuesta de diseño del sistema de tratamiento biológico para la industria acuícola a escala real

La Industria acuícola de la Finca El Rincón realiza el lavado total de los tanques de crianza semanalmente, el volumen de agua que sale de los 8 tanques de crianza semanalmente son 45000 L (Tabla1). Este será nuestro volumen de agua para el escalado de nuestra planta piloto donde trabajamos un volumen de 50L. El volumen esperado de solidos sedimentables que se sedimentaran en el sedimentador primario será de 5625 L (12,5% de la muestra). El volumen de agua que entraría al biorreactor semanalmente será de 39,375 L, por eso es necesario realizar dos biorreactores debido a que la actividad biológica de las microalgas alcanza su mayor remoción a los 12-16 días del proceso. Se conservara la forma circular que se usó para el diseño de los sedimentadores y los lechos de secado con su misma inclinación de 14° en su parte inferior de la tolva. Se conservó el mismo diámetro para todos los tanques para facilitar la fabricación de un molde único. A continuación, se presenta un diseño del sistema en planta, con sus alzados laterales y los detalles del mismo. (Figura 36, 37, 38)

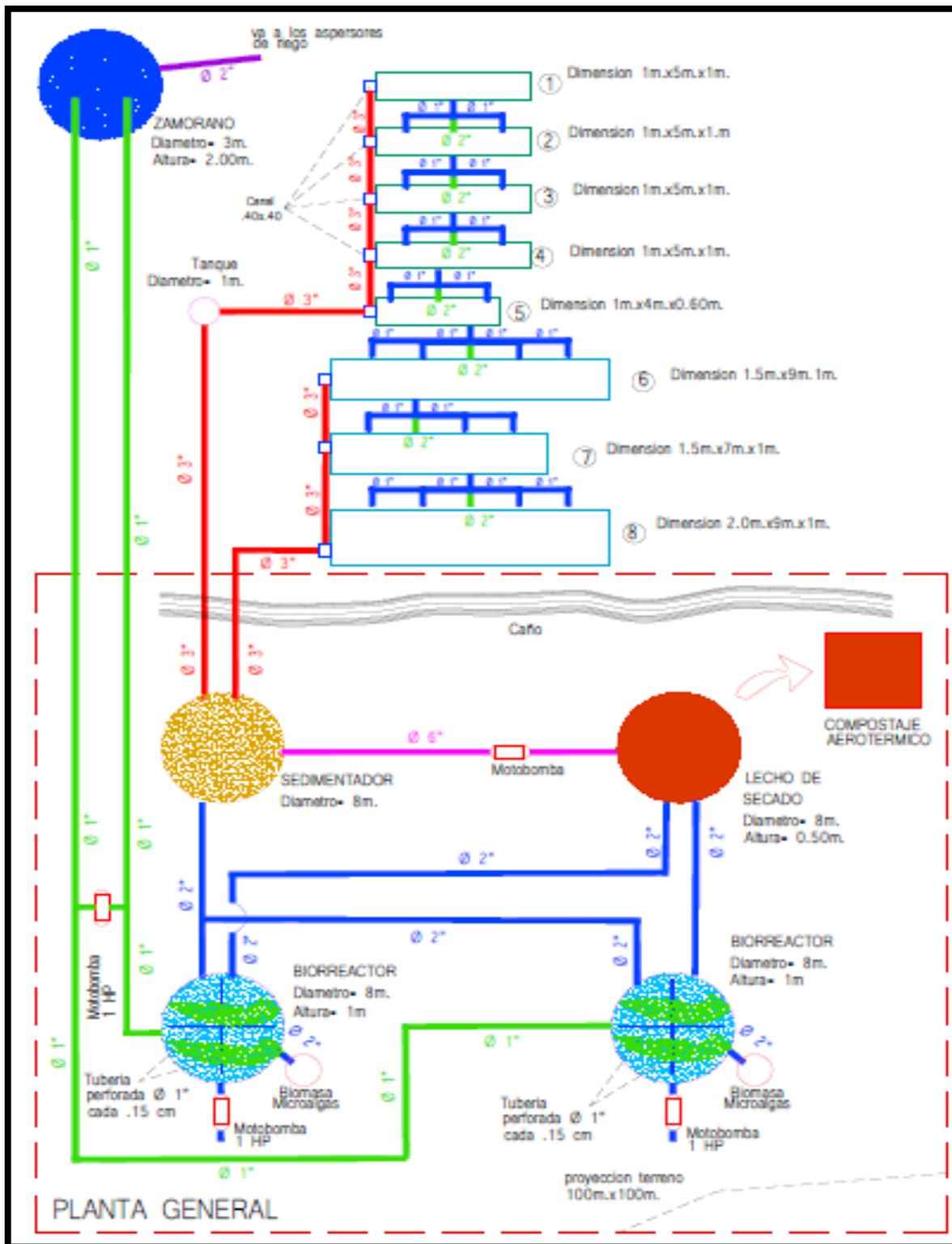


Figura 36. Planta general del sistema biológico para tratamiento efluentes industria acuícola

Finca El Rincón. Fuente: autor.

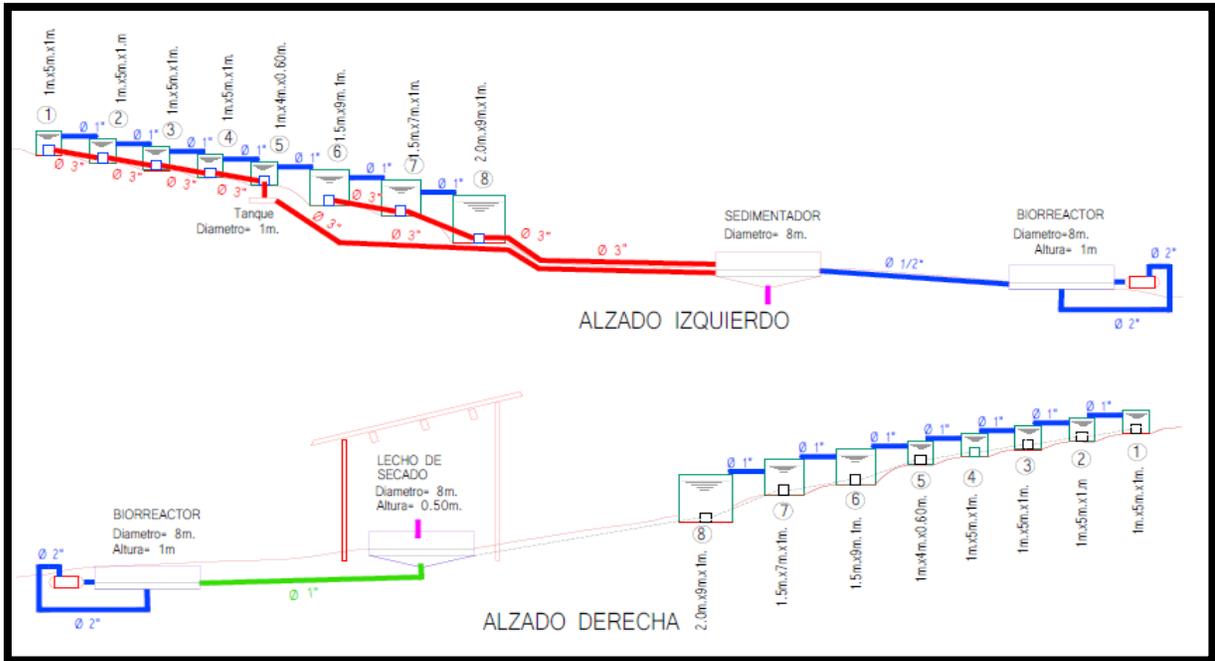


Figura 37. Alzado izquierda y derecha del sistema biológico para tratamiento efluentes industria acuícola Finca El Rincón. Fuente: autor.

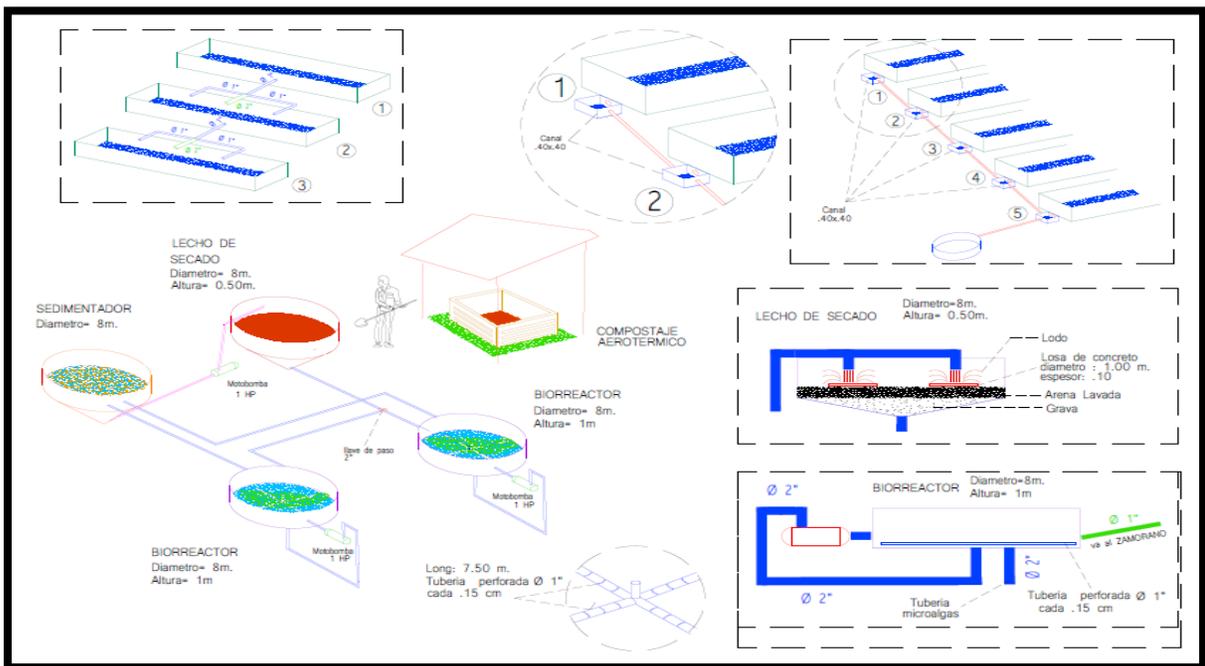


Figura 38. Detalles del sistema biológico para tratamiento efluentes industria acuícola Finca El Rincón. Fuente: autor.

En nuestra planta piloto usamos PMMA de 5mm para la construcción de cada uno de los elementos del sistema biológico. A continuación, presentamos algunos posibles materiales con los que se pueda construir nuestro sistema biológico. Quedará a criterio del cultivador el material con el que lo desee implementar, analizando las ventajas y desventajas de cada material (Tabla 7.)

MATERIAL	VENTAJAS	DESVENTAJAS	PRECIO
Polimetilmetacrilato PMMA de 10mm (ACRIPLAS)	<ul style="list-style-type: none"> • Amplias posibilidades de termoformado • Baja densidad (1.19 g/mL) • Alta transparencia (93%) • Disponibilidad local • Calidad óptica casi perfecta. 	<ul style="list-style-type: none"> • El volumen máximo de construcción es de 1m³ • Material no tiene alta durabilidad, puede presentar agrietamiento o cristalización. 	\$ 2'950.000 por m ³ , \$118'000.000 para los 40 m ³ .
Concreto con soporte acero reforzado (INCEL LTDA)	<ul style="list-style-type: none"> • Con mantenimiento periódico su vida útil es de 20 a 30 años • Alta resistencia debido a que se realiza por fundición total de la estructura. 	<ul style="list-style-type: none"> • No puede moverse del sitio donde se construye • Puede presentar erosión en lugares fríos, necesita mantenimiento cada 6 meses • Es necesario mano de obra profesional para su construcción. • Bastante costosos • Debido a las variaciones de temperatura se quiebran, parten o fracturan. 	\$26.972.365 cada tanque de 40 m ³
Fibra de vidrio doble capa con alma de acero en ángulo de 1 pulgada. (INGELCONS)	<ul style="list-style-type: none"> • Los tanques de fibras de vidrio son altamente resistentes a golpes y forcejeos. • No tiene ningún elemento que se oxide, no hay corrosión, son altamente higiénicos. • Es resistente a variaciones bruscas de temperatura, por lo que, pueden estar en lugares calientes, así como 	<ul style="list-style-type: none"> • Difícil el transporte desde el sitio de comercialización (Bogotá), es necesario sumar el costo del desplazamiento del operario que lo construiría, con los viáticos. 	\$3'300.000 cada tanque de 40 m ³

	<p>también, en lugares fríos, sin afectar su eficiencia.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Son fáciles de instalar. • Se puede reparar fácilmente • Resistencia acústica, son absorbentes a vibraciones y además, no son dañinos para el medio ambiente. 		
<p>Lámina de acero galvanizado calibre 18 (1.2 mm) con recubrimiento interior en geo membrana de PVC de 0.75 - 0.8</p> <p>(INTECMECOL SAS)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Estructura compacta y resistente para soportar las arduas faenas de trabajo. • Facilidad y posibilidad de hacer ductos y conexiones laterales entre tanques. • Puede fácilmente desmantelarse y re-ensamblarse en otro lugar. • Seguridad y fácil acceso para hacer la limpieza, debido a la resistencia estructural de las chapas en acero galvanizado. • Resistencia a la corrosión, radiación solar y productos químicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Es necesario la protección total de la geo membrana, evitando daños y perforaciones por descuidos, accidentes o vandalismo en los más de 20 años de vida útil de la estructura en acero. 	<p>\$8'840.000 cada tanque de 40 m³</p>

Tabla 7. Ventajas y desventajas del material de construcción de tratamiento biológico

5. CONCLUSIONES

✓ De acuerdo a los resultados obtenidos de remoción de nitratos y fosfatos a los doce días: *Chlorella* sp 42% y *Scenedesmus* sp 69,3% respectivamente se plantea la utilización de estas dos microalgas para posteriores estudios de Biorremediación a mayor escala en aguas residuales acuícolas. *Arthrospira* sp debido a los resultados presentados no se recomienda para este bioproceso.

✓ El fotorreactor que obtuvo las mejores eficiencias en remoción de contaminantes es el fotorreactor laminar, con 4 de los 6 parámetros estudiados. Mientras que, el fotorreactor que obtuvo el mayor porcentaje de N en la producción de biomasa fue el fotorreactor air-lift.

✓ La utilización de las microalgas *Chlorella* sp y *Scenedesmus* sp tienen un valor agregado de producción de biomasa como posible fuente de nitrógeno en fertilización de suelos. Además, la biomasa algal generada puede ser empleada para piscicultura como fuente de grasa y proteína en alimentación humana y animal.

✓ Con el uso de las microalgas *Chlorella* sp y *Scenedesmus* sp como interés global ante la necesidad de reducir la concentración de nitrógeno (N) y fósforo (P) en los efluentes secundarios y terciarios de la depuración de aguas residuales urbanas e industriales se evita la eutrofización de cursos de agua y contaminación de acuíferos.

✓ Al evaluar el impacto social del proyecto con respecto al potencial de desarrollo de un sistema biológico para el tratamiento de efluentes de la Granja Piscícola El Rincón, se influirá en la generación de empleo, la ampliación de la frontera agrícola y al incremento de consumo per cápita de pescado por la atracción del turista al sitio.

✓ El desarrollo de este proyecto permitirá informar a los propietarios de las Granjas Piscícolas, las restricciones para el desarrollo de la actividad, los riesgos sanitarios y efectos

ambientales del proceso. El riesgo considerado está representado por la contaminación del producto, ocasionada por un deficiente tratamiento de las aguas residuales, pero factible de ser controlado mediante el tratamiento de las aguas y la depuración de contaminantes de la misma.

✓ El principal efecto del tratamiento de las aguas residuales sobre el ambiente es la reducción drástica de la contaminación de los cuerpos de agua, donde habitualmente se dispone de los desechos como es la Laguna Comagüeta. También se debe tener en cuenta la recuperación del agua y de nutrientes para la actividad agrícola.

✓ La incorporación del abono orgánico y los biofertilizantes a base de microalgas a tierras de la agricultura permitirá formar y conservar suelos. Estas actividades agrícolas producirán oxígeno que se incorporará a la atmósfera, lo que mejorará el ambiente del ecosistema lagunar.

6. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda trabajar en una cultura medioambiental del empresario que le permita entender la relación industria-ambiente, junto al conocimiento de los residuos que genera su actividad y la potencialidad de éstos
- ✓ Se recomienda realizar un análisis costo-beneficio de la implementación del diseño en campo de cada uno de los fotorreactores, ya que ambos alcanzan altas remociones.

BIBLIOGRAFÍA

- PND 2014-2018. (s.f.). *Plan Nacional de Desarrollo (2014 – 2018). Prosperidad para Todos, Expedido mediante Ley 1753 del 9 de Junio de 2015.*
- Abalde, J., Herrero, C., & Paredes, F. P. (1995). *Microalgas: cultivo y aplicaciones*. España: Universidad de Coruña.
- Acosta, E. (2004). *Evaluación de la remoción de nutrientes de aguas de porqueriza mediante el uso de microalgas*. . Universidad Nacional de Colombia.
- Aguilar, A., Villanueva, S., & Guzmán, P. (2006). La contaminación del agua como una externalidad para la producción pesquera y acuícola. *Pesca, Agricultura e Investigación en México*.
- Albarracín, I. (2007). La producción de Biocombustibles con eficiencia, estabilidad y equidad. *Microalgas: Potenciales Productoras de Biodiesel. XV Simposio Electrónico Internacional*.
- American Public Health Assosiation, American Water Works Assosiation, Water Enviroment Federeation. (2012). *Estándar Methods for the examination of wáter and wastewater. 22ND edition*.
- APHA/AWWA/WEF. (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. https://doi.org/ISBN_9780875532356. *Standard Methods*, 541. doi:https://doi.org/ISBN_9780875532356
- Aplicaciones de las Microalgas: estado de la técnica*. (2013). Gijón, Asturias. España: AST. Ingeniería S.L.
- AQUAREC. (2006). Integrated concepts for reuse of upgraded wastewater. Guideline for quality standards for water reuse in Europe. *University of Barcelona*.
- Arana, J. L., Justo, A., Muela, M., Pocino, J., & Barcina, I. E. (1997). Influence of a survival

process in a freshwater system upon plasmid transfer between *Escherichia coli* strains. .

Microbial Ecology 31, 41-49.

Arévalo, J. C., & Malo, B. O. (2017). *Evaluación del uso de la microalga Chlorella vulgaris en la remoción de materia orgánica de las aguas residuales de laptar el salitre a nivel laboratorio.* Obtenido de <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6035/1/1014249411-2017-I-IQ.pdf>

Arévalo, L., & Rosero, L. E. (1992). Análisis de la calidad de agua que fluye de los estanques excavados para el cultivo de la trucha arcoiris en el corregimiento de la Laguna municipio de Pasto.

Arredondo-Vega, B., & Voltolina, D. (2006). Métodos y herramientas analíticas en la evaluación de la biomasa microalgal. *Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz, B.C.S., México. Capítulo 2, 21-30.*

AST Ingeniería. (2014). Aplicaciones de las microalgas: estado de la técnica. *AST Ingeniería S.L.* Obtenido de <http://www.ast-ingenieria.com/guia-malgas-1>.

Austin, B., & Allen-Austin, D. (1985). Bacterial pathogens of fish. *Journl of Applied Bacteriology* 58, 483-506. .

Avila Peltroche, J. G. (2015). *Evaluación de la remoción de nitratos y fosfatos a nivel laboratorio por microalgas libres e inmovilizadas para el Tratamiento Terciario de Aguas Residuales Municipales Tesis para optar el título profesional de Licenciado en Biología.* Obtenido de <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/urp/899>

Barbosa, G. S. (2008). O Desafio Do Desenvolvimento Sustentável. *Visões I (4)*, 63-72.

Bastidas, O. (2011). Conteo Celular con Cámara de Neubauer. *Tech. Note-Neubauer Chamb. Cell Countign - Celeromics,* 1-6. Obtenido de <http://www.celeromics.com/es/resources/docs/Articles/Conteo-Camara-Neubauer.pdf>

- Beltrán, C. E. (2013). Contribución De La Pesca Y La Acuicultura a La Seguridad Alimentaria Y El Ingreso Familiar En Centroamérica.
- Betancur, J. L., Rivera, C. N., Echeverri, V., Trujillo, H. T., & Taborda, C. G. (2010). *Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de la trucha arcoíris en el departamento de Antioquia*. Bogotá.
- Beveridge, M. (1996). *Cage Aquaculture. Second Edition. Fishing News Book, Oxford*.
- Beveridge, M. C., Phillips, M. J., & Macintosh, D. J. (1997). Aquaculture and the environment: The supply of and demand for environmental goods and services by Asian aquaculture and the implications for sustainability. *Aquaculture Research*, 28(10), 797-807. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.1997.tb01004.x>
- Boyd, C. E. (2003). Guidelines for aquaculture effluent management at the farm-level. *Aquaculture*, 226(1-4), 101-112. doi:[https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00471-X](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00471-X)
- Buschmann, A. (2001). Impacto ambiental de la acuicultura. Chile: Fundación Terram.
- CAN. (2005). Manual de Estadísticas Ambientales. . *COMUNIDAD ANDINA. Santa Cruz de la Sierra*, 31-45.
- Canet, R., Pomares, E., Estela, M., & Tarazona, E. (1996). Efecto de los lodos de depuradora en la producción de hortalizas y las propiedades químicas del suelo. *Investigación agraria. Producción y protección de vegetales*, 83-100.
- Capacho Navia, D. I. (2016). La vegetación de los humedales altoandinos del sector de Presidente, Paramo Almorzadero. *Universidad de Alicante*.
- Cardenas Guzman, A. C., & Medina Rincon, J. (2017). *Diseño y construcción de una planta de tratamiento de agua potable a escala para el laboratorio de hidráulica de la Universidad Santo Tomás*. Obtenido de <http://repository.usta.edu.co/handle/11634/9573>
- Carpio, T. (2007). *Sólidos totales secados a 103-105°C*. Instituto de Hidrología, meteorología y

estudios ambientales (IDEAM).

- Cartagena Arevalo, J. C., & Malo Malo, B. O. (2017). *Evaluación del uso de la microalga Chlorella vulgaris en la remoción de materia orgánica de las aguas residuales de la PTAR El Salitre a nivel laboratorio.* Bogotá.
- Carvalho, A. P., & Meireles, L. A. (2006). Microalgal Reactors: A Review of Enclosed System Designs and Performances. 1490-1506. *Biotechnol Progr.* 22, 1490-1506.
- Chacón, C., Andrade, C., Cárdenas, C., Araujo, I., & Morales, E. (2004). Uso de Chlorella sp. Y Scenedesmus sp. en la remoción de nitrógeno, fósforo y DQO de aguas residuales urbanas de Maracaibo, Venezuela.
- Chamorro, G., Salazar, M., Araujo, K., Dos Santos, C., Ceballos, G., & Castillo, L. (2002). Update on the pharmacology of Spirulina (Arthrospira), an unconventional food. 232-240.
- Chang, J. (2009). *Limnologia.* Guayaquil, Ecuador.
- Claros, J. (2012). *Estudio del Proceso de Nitrificación y Desnitrificación Vía Nitrito para el Tratamiento Biológico de Corrientes de Agua Residual con Alta Carga de Nitrógeno Amoniacal (Tesis Doctoral).* Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Cofie, O., Agbottah, S., Strauss, M., Esseku, H., & Montangero, A. (2006). Solid- liquid separation of faecal sludge using drying beds in Ghana: implications for nutrient recycling in urban agriculture. *Water Research* 40(1), 75-82.
- Converti, A., Casazza, A. A., Ortiz, E. Y., Perego, P., & Borghi, M. (2009). *Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of Nannochloropsis oculata and Chlorella vulgaris for biodiesel production.* Italia: Department of Chemical and Process Engineering; University of Genoa.
- Cornell, G., & Whoriskey, F. (1993). *The effects of rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) cage culture on the water quality, zooplankton, benthos, benthos and sediments of Lac du*

Passage. . Quebec.

CORPONOR. (2010). PARAMOS: SANTURBÁN, ALMORZADERO Y DMI BERLÍN.

Obtenido de <http://corponor.gov.co/es/index.php/es/estaticos/60-estaticos/660-areas-naturales-estrategicas>

Corral, M. L., Grizel, H., Montes, J., & Polanco, E. (2000). *La acuicultura: biología, regulación, fomento, nuevas tendencias y estrategia comercial. TOMO I-Análisis del desarrollo de los cultivos: medio, agua y especies.*

Corrêa, L., Drews-Jr, P., Silva da Costa Botelho, S., & Silva de Souza, M. (2017). Aprendizaje profundo para la clasificación de microalgas. *IEEE*.

Cripps, S. J. (2000). Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. . *Aquacultural Engineering*, 33-56.

DANE. (s.f.). *Sólidos Suspendidos Totales*. Obtenido de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/solidos_suspension.pdf

Degen, J., Uebele, A., Retze, A., Schmid-Staiger, U., & Trosch, W. (2001). A novel airlift photobioreactor with baffles for improved light utilization through the flashing light effect. *Journal of Biotechnology* 92, 89–94.

DIGESA. (2007). *Análisis Microbiológico de Aguas Residuales por Técnicas de los Tubos Múltiples de Fermentación (NMP)*. . Lima, Perú.

DINARA. (2010). *Manual básico de Piscicultura en estanques. Dirección Nacional de Recursos Acuáticos*. Montevideo-Uruguay.

Echarri, L. (1998). *Ciencias de la tierra y del medio ambiente*. Barcelona: Editorial Teide S.A.

FAO. (1983). *Planificación del Desarrollo de la Acuicultura*. Roma.

FAO. (2005). *Visión general del sector acuícola nacional - Colombia*. Departamento de Pesca y

Acuicultura de la FAO.

FAO. (2014). *Manual practico para el cultivo de trucha arcoiris*. Guatemala: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

FAO/OSPESCA. (2002). *Informe de la Reunión Ad Hoc de la Comisión de Pesca Continental para América Latina sobre la Expansión de los Diferentes Tipos de Acuicultura Rural en Pequeña Escala como Parte del Desarrollo Rural Sostenido*. . Panamá, República de Panamá.

Fernandez Sevilla, J. M. (2014). *Bioteconologia Microalgal*. Universidad de Almeria, España.

Fernandez, M. (2013). Diseño, montaje y caracterización de fotobiorreactores airlift para el cultivo de la microalga *Chlorella sorokiniana*.

Folke, C. &. (1992). Aquaculture with its environment: prospects for sustainability. . *Ocean & Shoreline Management Ed. 17*, 5-24.

Forero, R. (2007). Aproximación a la problemática del manejo y tratamiento de las aguas residuales del corregimiento de Arauca (Palestina). *Tesis de grado. Manizales: Universidad Nacional de Colombia*. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/973/#sthash.qIKYddPi.dpuf>

Gál, D. (2003). Experiments on the nutrient removal and retention of a pond recirculation system. *Hydrobiologia*, 767–772.

Galindo, M. A. (2008). *Diccionario de Economía Aplicada: Política económica, economía mundial y estructura económica*. Ecobook.

Gallego, I., Garcia, D., & Diaz, C. (2003). Sistema de recirculación de agua para cria de alevin de Trucha arcoiris y carpa común. En R. I. Agua, *Agua Potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas*.

Garbisu, C., Amezaga, I., & Alkorta, I. (2003). Biorremediación y ecología. *Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente*.

- García Galindo, C., & Luna Imbacuan, M. (2009). Evaluación de un Sistema de Filtración en Grava de Flujo Ascendente (FGA) como Alternativa para el Tratamiento de los Efluentes en la Producción de Tilapia Roja (*Oreochromis sp.*). *Trabajo de grado (Ingeniera Ambiental)*. Universidad del Cauca, Popayán.
- Garza, M. T., Almaguer, V., Rivera, J., & Loredó, J. Á. (2010). Bioingeniería aplicada a una columna empacada con *Chlorella sp* inmovilizada para remoción de metales pesados. *Ciencia UANL, México*.
- Gelineau, A., Medale, F., & Boujard, T. (1998). Effect of feeding time on post prandial nitrogen excretion and energy expenditure in rainbow trout. *J Fish Biol.*, 655-664.
- Giraldo, G. I. (1995). *Manual de análisis de aguas*. Manizales. Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co/50540/1/manualdeanalisdeaguas.pdf>
- González, L. E., Cañizares, O., & Baena, S. (1997). Efficiency of ammonia and phosphorus removal from a Colombian Agroindustrial Wastewater by the Microalgae *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus dimorphus*. *Bioresource Technology* 60, 259-262.
- González Rosa, L. E., Cañizares, R. O., & Baena, S. (1997). Efficiency of ammonia and phosphorus removal from a Colombian agroindustrial wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus dimorphus*. *Bioresource Technology* 60, 259-262 Elsevier Science.
- Goyenola, G. (2007). *Guía para la utilización de las Valijas Viajeras*. Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos.
- Hernández Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*.
- IDEAM . (s.f.). *Atlas de radiación solar de Colombia*. Obtenido de <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

- Infante, C., Angulo, E., Zárate, A., Barrios, F., & Zapata, C. (2012). PROPAGACIÓN DE LA MICROALGA *Chlorella* sp. EN CULTIVO POR LOTE: Cinética del Crecimiento celular. *Avances en Ciencias e Ingeniería*.
- Infante, C., Angulo, E., Zárate, A., Florez, J., Barrios, F., & Zapata, C. (2012). PROPAGACIÓN DE LA MICROALGA *Chlorella* sp. EN CULTIVO POR LOTE: CINÉTICA DEL CRECIMIENTO CELULAR. *Avances en Ciencias e Ingeniería*.
- INPA. (1995). *Fundamentos de Acuicultura Marina*.
- INPA. (1995). *Fundamentos de Acuicultura Marina*. Bogotá.
- INPA. (2002). *Fundamentos de Acuicultura Continental*. Bogotá.
- Jover, M., Martínez, S., & Tomás, A. y. (2003). Propuesta metodológica para el diseño de instalaciones piscícolas. *Revista AquaTIC*, 19.
- Kautsky, N. B. (1997). Ecological footprint for assessment of resource use and development limitations in shrimp and tilapia aquaculture. . *Aquaculture Research*, Ed. 28, 753-766.
- Kumar, K. (2011). Development of suitable photobioreactors for CO₂ sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria. *Bioresource Technology* 102 (2011) , 4945–4953.
- Larenas, J. J., Contreras, J., Oyanedel, S., Morales, M., & Smith, P. (1998). *Efecto de la densidad poblacional y temperatura en truchas arco iris (Oncorhynchus mykiss) inoculadas con *Piscirickettsia salmonis**. Facultad de Ciencias Veterinarias y Pecuarias. Universidad de Chile.
- Lazur, A. M., & Britt, D. C. (1997). Pond Recirculating Production Systems. *SRAC Publication*, (455), 8.
- Lin, S. (2005). Algal Culturing Techniques. . *Journal of Phycology* (Vol. 41). . doi:<https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2005.00114.x>

- Lizarralde, R. A. (2014). Plan Nacional para el Desarrollo de la Acuicultura Sostenible en Colombia - PlaNDAS.
- López, J., Salas, J., & Gómez, V. (2008). *Diagnóstico del estado de trofización y estudio de la variabilidad de los parámetros limnológicos y su interrelación con la producción de trucha arcoíris en jaulas flotantes en el Lago Guamuez, Pasto: Corponariño y Universidad del Nariño*. Pasto.
- Lucero, A. S. (2015). *Cultivo de consorcio microalgal autóctono como parte del proceso de bioremediación de efluentes urbanos*. Argentina.
- Marcinek, R., & Wirth, A. M. (1998). Enterococcus faecalis gene transfer under natural conditions in municipal sewage water treatment plants. . *eApplied and Environmental Microbiology* 64(2), 626-632.
- Melissa, L. V. (2014). *Recuperación y reciclamiento de residuales de nitrógeno y fósforo Litopenaeus vannamei mediante sistemas de fitorremediación*.
- Mentaberry, A. (2011). Fitorremediación. *Agrobiotecnología*.
- METCALF, & Eddy, y. (2003). *Ingeniería de Aguas Residuales*.
- Morales, G. A. (2004). *Crecimiento y eficiencia alimentaria de trucha arcoíris (Oncorhynchus mykiss) en jaulas bajo diferentes regímenes de alimentación*. . Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Moronta, R., & Mora, R. y. (2006). Respuesta de la microalga Chlorella sorokiniana al pH, salinidad y temperatura en condiciones axénicas y no axénicas. *Revista Facultad de Agronomía*. V. 23. n.1. Caracas.
- Neorr, M. T., & Buscuvr, T. C. (2003). Biological wastewater treatment in aquaculture More than just bacteria. *Cahiers de Biologie Marine*.
- Núñez López, R. A., Meas Vong, Y., Ortega Borges, R., & Olgúin, E. (2004). Fitorremediación:

fundamentos y aplicaciones.

Núñez, P., & Somoza, G. (2010). *Guía de Buenas Prácticas de Producción Acuícola para Trucha Arco-iris*. Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA).

Olguín, E. (2003). Phycoremediation: key issues for cost-effective nutrient removal processes. *Biotechnology Advances* 22,, 81-91, Elsevier Science.

Olivieri, G., Salatino, P., & Marzocchella, A. (2014). Advances in photobioreactors for intensive microalgal production: configurations, operating strategies and applications. *J. Chem. Technol. Biotechn.*,89(2),, 178-195.

OPS/CEPIS. (2005). *Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores*. Lima. Obtenido de <http://www.bvsde.ops-oms.org/tecapro/documentos/agua/158esp-diseno-desare.pdf>

Pardo, S., Soriano, E., & Suarez, H. (2006). Tratamiento de efluentes: Una vía para la acuicultura responsable. 20-29.

Pardo, S., Suárez, H., & Soriano, E. (2006). Tratamiento de efluentes: una via para la agricultura responsable. *Rev.MVZ Córdoba*, 20-29.

Parra, O. (2006). Estado de conocimiento de las algas dulceacuícolas de Chile (Excepto Bacillariophyceae). *Gayana (Concepción)*, 70(1), 8-15.
doi:<https://doi.org/10.4067/S0717-65382006000100003>

Pérez García, O., Bashanm, Y., & Puentem, E. M. (2011). Organic carbon supplementation of sterilized municipal wastewater is essential for heterotrophic growth and removing ammonium by the microalga *Chlorella vulgaris*. *J. Phycol.*, 47(1), 190-199.

Perez-García, O., De-Bashan, L. E., Hernandez, J. P., & Bashan, Y. (2010). EFFICIENCY OF GROWTH AND NUTRIENT UPTAKE FROM WASTEWATER BY HETEROTROPHIC, AUTOTROPHIC, AND MIXOTROPHIC CULTIVATION OF CHLORELLA VULGARIS IMMOBILIZED WITH AZOSPIRILLUM

- BRASILENSE. *Journal of Phycological*, 800-812.
- Pescod, M. B. (1971). Sludge handling and disposal in tropical developing countries. . *Journal of Water Pollution and Control Federation* 43(4), 555-570.
- Petterson, K. (1988). The mobility of phosphorus in fishfood and fecals. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretish und Angewandte Limnologie*, 200-226.
- Pizarro H., R. A. (2012). *Crecimiento y capacidad de biorremediación de Chlorella vulgaris cultivada en aguas residuales generadas en la produccion de Seriola lalandi*. Universidad Antofagasta.
- Quintero, L., Pardo, G., & Quintero, A. (2011). Manual técnico para la producción de peces de consumo a pequeña escala en el departamento de Cundinamarca. . *Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia*.
- Ramallo, R. S. (2003). *Trtamiento de aguas residuales*. REVERTE .
- Ramírez, L. G., Quiroz, L. Z., & Jacob-Lopes, E. (2013). Fotobiorreactor: herramienta para cultivo de cianobacterias. . *Artículo de revisión en ciencia y tecnología* 6 (2), 9-19.
- Ramos Suarez, J. L. (2014). *Produccion de biogas a partir de biomasa de la mcroalga Scenedesmus sp procedente de diferentes procesos*. Universidad politecnica de Madrid.
- RAS. (2000). REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. *Ministerio de vivienda Ciudad y territorio*. Obtenido de http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_a_.pdf
- Reyes, J., Martinez, S., Sastre, A., Bigeriego, M., & Porcel, M. (1996). Resultados preliminares de la aplicación de lodos de depuradora como fertilizante y su implicación en la migración de nitratos a través de la zona no saturada. *Geogaceta*, 1284-1288.
- Roa Parra, A. L., & Cañizares Villanueva, R. O. (2012). Bioremediacion de aguas con fosfatos y

nitratos utilizando *Scenedesmus incrassatulus* inmovilizado. *Bistua: Revista de La Facultad de Ciencias Básicas*, 10(1), 71-79. doi:<https://doi.org/10.24054/01204211>

- Robles-Heredia, J., Sacramento-Rivero, J., Ruiz-Marín, A., & Baz-Rodríguez, S. (2016). Evaluación de crecimiento celular, remoción de nitrógeno y producción de lípidos por *Chlorella Vulgaris* a diferentes condiciones de aireación en dos tipos de fotobiorreactores anulares. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 15, núm. 2, 361-377.
- Rodríguez, G. V. (2001). *Fundamentos de Acuicultura continental*. 2ed. . Bogotá, Colombia: Grafimpresos Quinteros.
- Romero Rojas, J. A. (2004). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Universidad de San Carlos, Guatemala.
- Romero Rojas, J. A. (2005). *Calidad del Agua. Colombia*. Editorial Colombiana de Ingeniería. 2 Edición.
- Romero, T., & Fresneda, I. (2001). Cultivo semicontinuo de la microalga *Chlorella* sp. para el tratamiento de residuales pesqueros. . *Boletín del Centro de Investigaciones Pesqueras* 35 (1).
- Ruiz Becerra, G. (2016). *Caracterización microbiológica y mantenimiento de dos cepas de microalgas para la producción de complemento alimenticio, lípidos y otros productos de valor agregado*. Mexico.
- Sagratzki, C., Pereira-Filho, M., Bordinhon, A., & Fonseca, F. I. (2004). Tolerância de juvenis de pirarucu ao aumento da concentração de amônia em ambiente confinado. . *Pesq Agrop Bras.*, 513-516.
- Salazar, M. (2005). Aplicación e importancia de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales.
- Sharrer, M. (2007). Membrane biological reactor treatment of a saline backwash flow from a

- recirculating aquaculture system. *Aquaculture Engeneering*, 159-176.
- Standar Methods for the examination of water and wastewater. 22nd Edition.* (2012). American Public Health Assosiation, American Water Works Assosiation y Water Enviroment Federation.
- Stephens E, R. I. (s.f.). et al. Future prospects of microalgal biofuel production systems. *Trends in Plant Science*. 2010;15(10): Doi:10.1016/j.tplants.2010.06.003. 554-564.
- Sugita, K., & Shibuya, H. (1996). Antibacterial abilities of intestinal bacteria in freshwater cultured fish. *Aquaculture 145* , 195-203.
- Tafur, J. (2015). Tratamiento de aguas residuales in vitro por medio de la microalga *Chlorella* sp. en el municipio de Barrancabermeja, Colombia. . *Revista para Difusión y Divulgación de Avances de Investigación*, 6 (10). .
- Tam, N., & Wong, Y. S. (1989). Wastewater Nutrient Removal by *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus* sp. *Environmental Pollution* 58, 19-34.
- True, B., Johnson, W., & Chen, S. (2004). Reducing phosphorus discharge from flow-through aquaculture I: facility and effluent characterization., . *Aquacultural Engineering*, 129-144.
- Uribarren B., T. (2016). Criptosporidiosis, Criptoporidiasis o Criptosporidiosis. *Universidad Autónoma de Mejico, Facultad de Medicina*.
- Weston, D. (1990). Quantitative examination of macrobenthic community changes along an organic enrichment gradient . *marine ecology progress series*, 233-244.

Anexo 2. Tests Spectroquant® usados para análisis de las aguas residuales

Al analizar agua y alimentos, la fiabilidad de los resultados es determinante. Para mantener y mejorar nuestra calidad de vida, se impone como necesario un análisis exhaustivo mediante tests correctos y de resultados fiables.

Con los tests fotométricos de Spectroquant y los sistemas de prueba de Merck, podrá tener confianza en los resultados obtenidos.

Los tests utilizados para el análisis de las aguas residuales de la industria acuícola, con su método y técnica correspondiente son:

NOMBRE DEL TEST	MÉTODO	TÉCNICA
Test de Sulfatos SO ₄ ⁻²	<p>Los iones sulfato forman con los iones bario sulfato bórico difícilmente soluble.</p> <p>La turbidez que así se produce se mide en el fotómetro (procedimiento turbidimétrico).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pipetear 5,0 ml en una cubeta de reacción y mezclar. • Añadir 1 micro cuchara de reactivo (SO₄-1K) y agitar vigorosamente la cubeta firmemente cerrada hasta que el reactivo se haya disuelto completamente. • Dejar en reposo exactamente 2 minutos (tiempo de reacción), luego medir la muestra de medición en el fotómetro.

<p>Test de fosfatos P</p>	<p>En solución sulfúrica los iones ortofosfato forman con los iones molibdato ácido molibdofosfórico. Este último, con ácido ascórbico, se reduce a azul de fosfomolibdeno (“PMB”) que se determina fotométricamente.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pipetear 5,0 ml en un tubo de ensayo. • Añadir 5 gotas de reactivo PO₄-1 y mezclar • Añadir 1 micro cuchara de reactivo (PO₄-2) y agitar vigorosamente hasta que el reactivo se haya disuelto completamente. • Dejar en reposo 5 minutos (tiempo de reacción), luego introducir la muestra de medición en la cubeta y medir en el fotómetro.
<p>Test de nitratos NO₃⁻</p>	<p>En ácido sulfúrico concentrado los iones nitrato forman con un derivado del ácido benzoico un nitrocompuesto rojo que se determina fotométricamente.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Introducir en un tubo taparrosa seco 1 micro cuchara rasa de reactivo NO₃-1 • Añadir con pipeta 5,0 ml de reactivo NO₃-2 y agitar vigorosamente durante 1 minuto hasta que el reactivo NO₃-1 se haya disuelto completamente • Verter muy lenta y cuidadosamente 1,5 ml de muestra preparada mediante la pipeta sobre el reactivo en la pared interna del tubo de ensayo mantenido inclinado. Mezclar inmediatamente durante poco tiempo agarrando el tubo solo por la parte superior. • Dejar en reposo la solución de reacción caliente durante 10 minutos (Tiempo de reacción) • Introducir la muestra de medición en la cubeta rectangular y medir en el fotómetro.
<p>Test de DQO</p>	<p>La muestra de agua se oxida con una solución sulfúrica caliente de dicromato potásico y sulfato de plata como catalizador. Los cloruros</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Agitar por balanceo la cubeta de reacción para poner en suspensión el sedimento • Verter cuidadosamente 2,0 ml mediante la pipeta sobre el reactivo en la pared interna de la cubeta de reacción mantenida inclinada

	<p>son enmascarados con sulfato de mercurio. A continuación se determina fotométricamente la concentración de los iones $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ amarillos no consumidos.</p>	<ul style="list-style-type: none">• Cerrar firmemente la cubeta con tapa roscada y Mezclar vigorosamente.• Calentar la cubeta durante 120 minutos a 148 °C en el termorreactor precalentado.• Sacar del termorreactor la cubeta caliente y colocarla en un soporte para tubos de ensayo para que se enfríe.• Al cabo de 10 minutos agitar la cubeta por balanceo y para enfriarla a temperatura ambiente volver a colocarla en el soporte para tubos de ensayo (tiempo de enfriamiento mínimo 30 minutos).• Medir en el fotómetro.
--	--	--

Anexo 3. Medios de cultivo para el crecimiento de microalgas

“Medio Basal de Bold (BBM)”

Recomendado para algas de agua dulce, especialmente: *Chlorella* sp., *Volvox* sp. y *Scenedesmus* sp.

Fórmula de preparación de soluciones:

- 1) Disolver cada una de las sales en 400 mL de agua destilada o desmineralizada.
- 2) Almacenar las 6 soluciones en frascos color ámbar y en refrigeración.

* Soluciones Patrón de Macronutrientes.

Nitrato de Sodio.....	10 g
Cloruro de Calcio Dihidratado.....	1 g
Sulfato de Magnesio Heptahidratado...	3 g
Fosfato de Potasio, dibásico.....	7 g
Fosfato de Potasio, monobásico.....	3 g
Cloruro de Sodio.....	1 g

* Solución patrón de Micronutrientes

Etilendiamintetracético.....	50 g
Hidróxido de Potasio.....	31 g
Agua.....	1000 mL

* Ácido Bórico.....	11.42 g
Agua destilada.....	1000 mL

* Sulfato de Hierro Heptahidratado

Agua Acidificada.....1000 mL (1 mL de Ácido Sulfúrico por cada litro de agua).

* Sulfato de Zinc Heptahidratado.....8.82 g

Cloruro de Manganeso Dihidratado.....1.44 g

Trióxido de Molibdeno..... 0.71 g

Sulfato de Cobre Pentahidratado..... 1.57 g

Nitrato de Cobalto Hexahidratado..... 0.49 g

Agua..... 1000 mL

Método de preparación:

- 1) A 900 mL de agua destilada agregar 10 mL de cada una de las soluciones de macronutrientes y 1 mL de las soluciones de micronutrientes.
- 2) Ajustar el pH a 6.8-7.2
- 3) Esterilizar durante 15 minutos a 15 libras de presión (121 °C)