

**EVALUACIÓN A ESCALA PILOTO DE UNA LAGUNA ALGAL DE ALTA TASA
ACOPLADA A UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DE
LA UNIVERSIDAD DEL VALLE, CAMPÚS MELÉNDEZ**

DIANA CAROLINA VIVEROS RUIZ



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL
AMBIENTE
INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2018**

**EVALUACIÓN A ESCALA PILOTO DE UNA LAGUNA ALGAL DE ALTA TASA
ACOPLADA A UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DE LA
UNIVERSIDAD DEL VALLE, CAMPÚS MELÉNDEZ**

DIANA CAROLINA VIVEROS RUIZ

**TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERA SANITARIA
Y AMBIENTAL**

**DIRECTOR:
PhD CARLOS ARTURO MADERA PARRA**

**CODIRECTOR:
PhD ENRIQUE PEÑA**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2018**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios, por permitirme culminar esta nueva etapa en mi vida y por guiar cada uno de mis pasos.

A mi mami por ser la persona que me inspira a ser cada vez mejor, por apoyarme y creer siempre en mí.

A mis hermanos Mary y Juan por aconsejarme y apoyarme en los momentos que más lo he necesitado.

A mi papá por apoyarme siempre.

A mi abuelito en el cielo por estar siempre junto a mí.

A mi abuela, tías, tíos, primas y primos por mantenernos como una familia unidad.

A mi novio por apoyarme y creer en mi incluso en los momentos en lo que pensé que no iba a poder lograrlo.

A los profesores Carlos Madera y Enrique Peña por estar dispuestos ayudarme durante el proceso de mi trabajo de grado.

A Natali por ser esa persona que me acompañó desde el principio en este proyecto, por ayudarme y apoyarme cada vez que lo necesité.

A todas las personas que hicieron parte del proyecto porque sin la ayuda de cada uno de ustedes, hoy no podría estar culminando esta etapa en mi vida.

A mis amigos de Ingeniería Sanitaria y Ambiental por todas las experiencias vividas.

A los profesores de Ingeniería Sanitaria y Ambiental por enseñarme tanto durante estos 5 años de carrera.

RESUMEN

Las instituciones de educación superior en Colombia producen agua residual con diversas características debido principalmente a la cantidad de estudiantes, profesores y trabajadores que albergan y la infraestructura con la que cuentan (restaurantes universitarios, centros deportivos, laboratorios, etc.). Para el año 2015, el Valle del Cauca contaba con 30 institutos de educación superior entre Oficiales y Privadas de las cuales 24 se encontraban ubicadas en la ciudad de Santiago de Cali (MEN, 2015), de dichas instituciones solo una contaba con planta de tratamiento de agua residual.

La falta de información oficial sobre las características (fisicoquímicas y microbiológicas) y el tratamiento del agua residual de campus universitarios por medio de una tecnología prometedora que presenta bajos costos en operación y mantenimiento, y a su vez genera biomasa que permite darle un valor agregado al agua residual motivó la realización de este trabajo de grado, el cual consistió en la evaluación a escala piloto de una laguna algal de alta tasa acoplada a un sistema para el tratamiento del agua residual del campus Meléndez de la Universidad del Valle.

El estudio se realizó durante un periodo de 7 semanas, con un caudal de diseño de 50 L/d y se efectuaron mediciones de parámetros como: pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, potencial de oxido-reducción, amonio, nitrato, alcalinidad, fosfatos, nitrógeno total Kjeldahl, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, carbono orgánico disuelto, solidos suspendidos totales, coliformes fecales, *Escherichia coli* y huevos de helminto; encontrando eficiencias de disminución de demanda química de oxígeno (filtrada), demanda bioquímica de oxígeno, carbono orgánico disuelto, amonio, nitrógeno total Kjeldahl y fosfatos del 64, 58, 48, 37, 44 y 15% respectivamente.

Palabras Claves: *Agua residual, instituciones de educación superior, Universidad del Valle – campus Meléndez, laguna algal de alta tasa.*

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	2
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	4
2. OBJETIVOS	8
2.1. <i>Objetivo general</i>	8
2.2. <i>Objetivos específicos</i>	8
3. MARCO TEÓRICO	9
3.1. <i>Agua Residual</i>	9
3.2. <i>UI GreenMetric</i>	9
3.3. <i>Laguna Algal de Alta de Alta Tasa</i>	10
3.4. <i>Tratamiento de Agua Residual por Medio de Lagunas Algales</i>	12
3.4.1. <i>Parámetros Ambientales que Inciden en el Crecimiento Algal</i>	13
3.5. <i>Legislación Colombiana</i>	14
4. METODOLOGÍA	16
4.1. <i>Zona de Estudio</i>	16
4.2. <i>Acople Tecnológico Laguna Algal de Alta Tasa</i>	17
4.4. <i>Estabilización y Puesta en Marcha del Sistema de Laguna Algal de Alta Tasa</i>	20
4.5. <i>Puntos de Muestreo</i>	21
4.6. <i>Variables de Respuesta Fisicoquímicas</i>	22
4.7. <i>Variables de Respuesta Microbiológicas</i>	23
4.8. <i>Taxonomía de Microalgas</i>	24
4.9. <i>Estimación de Clorofila a y Biomasa Algal</i>	24
4.10. <i>Manejo Estadístico de los Datos</i>	24
4.10.1. <i>Evaluación Punto de Medición Variables: DQO, DBO₅ y NTK</i>	25
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	26
5.1. <i>Características Afluente LAAT</i>	26
5.2. <i>Curva de Crecimiento Algal</i>	26
5.3. <i>Variables de Respuesta Fisicoquímicas</i>	27
5.3.1. <i>Parámetros “In Situ”</i>	27
5.3.2. <i>Comportamiento de la Materia Orgánica</i>	36
5.3.3. <i>Comportamiento de Nutrientes</i>	39
5.3.4. <i>Análisis Estadístico de las Variables DQO_{filtrada}, DBO₅ y NTK</i>	46
5.4. <i>Variables de Respuesta Microbiológicas</i>	46
5.5. <i>Cumplimiento de la Normativa</i>	48
5.6. <i>Taxonomía de Microalgas</i>	50
5.7. <i>Estimación de Biomasa Algal y Clorofila a</i>	51
6. CONCLUSIONES	55
7. RECOMENDACIONES	56
8. BIBLIOGRAFIA	57

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resultados parámetros medidos en sitio	6
Tabla 2. Resultados análisis de laboratorio	6
Tabla 3. Principales características de las lagunas algales de alta tasa	10
Tabla 4. Valores límites máximos permisibles de vertimientos que descargan a un alcantarillado público	15
Tabla 5. Criterios de calidad para el uso de agua residual tratada en zonas verdes y jardines..	15
Tabla 6. Sitio, Frecuencia y Variables Fisicoquímicas a medir en la LAAT	17
Tabla 7. Sitio, frecuencia y variables fisicoquímicas medidas en la LAAT	22
Tabla 8. Sitio, frecuencia y variables fisicoquímicas medidas en el laboratorio.....	23
Tabla 9. Horarios de medición LAAT.....	23
Tabla 10. Sitio, frecuencia y variables microbiológicas a medir en la LAAT	23
Tabla 11. Características agua residual sedimentada y afluente LAAT	26
Tabla 12. pH, Temperatura, Oxígeno Disuelto (OD), Conductividad Eléctrica (CE), Potencial de Óxido-Reducción (ORP) y Alcalinidad de la LAAT	27
Tabla 13. Resultados y porcentajes de disminución de DQO _{filtrada} , DBO ₅ , COD y SST	36
Tabla 14. Resultados y porcentajes de disminución de NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ y NTK	40
Tabla 15. Análisis de varianza para evaluar el efecto del punto de medición y la semana.....	46
Tabla 16. Comparación de los resultados obtenidos en el efluente de la LAAT con la legislación colombiana de vertimientos sobre alcantarillado público.....	49
Tabla 17. Comparación de los resultados obtenidos en el efluente de la LAAT con la legislación colombiana del uso de agua residual tratada.....	49
Tabla 18. Tratamiento de agua residual por medio de grupos algales	50

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Red de alcantarillado facultades y edificios que drenan hacia el canal colector de la calle 16	5
Figura 2. Esquema general LAAT.....	11
Figura 3. Localización del Sistema de Tratamiento. a. Ubicación Universidad del Valle,.....	16
Figura 4. Esquema general del acople tecnológico a escala piloto	17
Figura 5. Sistema Laguna Algal de Alta Tasa	18
Figura 6. Localización cámara de inspección. a. Cámara de inspección ubicada entre los edificios 340 y 341. b. Cámara de inspección.....	19
Figura 7. Sistema implementado para la extracción del agua residual. a. Electrobomba sumergible RX 2 VORTEX. b. Montaje electrobomba	19
Figura 8. Esquema red de alcantarillado Universidad del Valle	20
Figura 9. Proceso de arranque Laguna Algal de Alta Tasa. a. Laguna Algal de Alta Tasa Instalada, b. Adición del inóculo de <i>Paracholrella Kessleri</i> , c. Montaje final Laguna Algal de Alta Tasa.....	21
Figura 10. Puntos de muestro Laguna Algal de Alta Tasa. a. Vista en planta LAAT, b. Vista de perfil LAAT.....	22
Figura 11. Curva de crecimiento algal fase de arranque	27
Figura 12. Comportamiento del pH en los puntos de medición durante las semanas de experimentación	28
Figura 13. Comportamiento del pH según el horario y punto de medición	29
Figura 14. Comportamiento de la temperatura según el horario y punto de medición	30
Figura 15. Comportamiento del oxígeno disuelto según el horario y punto de medición.....	32
Figura 16. Comportamiento de la conductividad eléctrica según el horario y punto de medición	32
Figura 17. Comportamiento del potencial de óxido-reducción según el horario y punto de medición.....	34
Figura 18. Relación entre alcalinidad, horario y punto de medición.....	35
Figura 19. Comportamiento de la alcalinidad en los puntos de medición durante las semanas de experimentación	36
Figura 20. Comportamiento de la DQO en la LAAT	37
Figura 21. Comportamiento del COD en la LAAT	39
Figura 22. Comportamiento del amonio según punto de medición y horario	40
Figura 23. Comportamiento del amonio en los puntos de medición durante las semanas de experimentación	41
Figura 24. Transformaciones del nitrógeno, procesos de nitrificación y desnitrificación	42
Figura 25. Comportamiento del nitrato según el punto de medición	43
Figura 26. Comportamiento del NTK en la LAAT	44
Figura 27. Comportamiento del fosfato según día de la semana y punto de medición	45
Figura 28. Comportamiento coliformes fecales	47
Figura 29. Comportamiento <i>Escherichia Coli</i>	48
Figura 30. Comportamiento radiación solar	52

Figura 31. Relación entre clorofila a y radiación solar (diciembre 6 de 2017)	52
Figura 32. Relación entre clorofila a y radiación solar (diciembre 13 de 2017)	53
Figura 33. Comportamiento biomasa algal.....	53

ABREVIACIONES

STAR: Sistemas de Tratamiento de Agua Residual

IES: Instituciones de Educación Superior

PTAR: Planta de Tratamiento de Agua Residual

LAAT: Laguna Algal de Alta Tasa

DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno

DQO: Demanda Química de Oxígeno

SST: Sólido Suspendido Total

PUMA: Plan Universitario del Medio Ambiente

CO₂: Dióxido de Carbono

OD: Oxígeno Disuelto

CE: Conductividad Eléctrica

ORP: Potencial de Óxido-Reducción

NH₄⁺: Amonio

NO₃: Nitrato

P-PO₄⁻³: Fosfatos

COD: Carbono Orgánico Disuelto

SST: Sólidos Suspendidos Totales

DQO_{filtrada}: Demanda Química de Oxígeno Filtrada

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población ha generado un incremento en la demanda de agua y a su vez en la generación de agua residual que debe ser tratada antes de su disposición final. Pero si estos residuos líquidos no son tratados y son vertidos directamente sobre cuerpos de agua o suelos, generaran problemas en el ambiente y en la salud de las personas. Según el informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos del año 2017, titulado “*Aguas residuales: el recurso desaprovechado*”, es probable que más del 80% del agua residual generada a nivel mundial es vertida al ambiente sin tratamiento alguno. Por su parte, se estima que más del 95% del agua residual generada en algunos países en desarrollo no cuentan con un tratamiento. La situación en América

Latina es bastante alarmante, solo el 20% del agua residual municipal e industrial es tratada antes de su disposición final (UNESCO, 2017).

Colombia es un país que por su ubicación geográfica cuenta con gran disponibilidad del recurso hídrico, esto hace que se deban tratar grandes volúmenes de agua residual en el país, pero no todos los municipios cuentan con este servicio. Para el año 2014, Colombia contaba con 640 Sistemas de Tratamiento de Agua Residual (STAR) distribuidos en 492 municipios lo que correspondía a una cobertura aproximada del 44% (SSPD, 2014).

En el caso del agua residual generada en instituciones universitarias, la información oficial sobre las características de esta agua residual es escasa. En Colombia existían 270 Instituciones de Educación Superior (IES), según información reportada por el Ministerio de Educación para el año 2016, de las cuales 78 Instituciones correspondían al sector oficial, mientras que 192 hacían parte del sector privado (MEN, 2016). Estas instituciones además de albergar gran cantidad de personas cuentan con infraestructuras de diferente índole (restaurantes, centros deportivos, laboratorios, etc.) que pueden producir agua residual de múltiples características.

Para el año 2015, el Valle del Cauca contaba con cerca de 30 Institutos de Educación Superior entre Oficiales y Privadas de las cuales 24 se encontraban ubicadas en la ciudad de Santiago de Cali (MEN, 2015), de dichas instituciones sólo la Universidad Autónoma de Occidente contaba con Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR).

La Universidad del Valle es considerada el principal centro de educación superior de carácter público del suroccidente colombiano, esta institución cuenta las sedes principales en el municipio de Santiago Cali, San Fernando y Meléndez, esta última alberga alrededor de 14,000 estudiantes. Se estima que este establecimiento educativo genera alrededor de 640 m³ por día de agua residual, valor que se incrementa considerablemente en temporada de lluvia (Lizcano et al., 2015).

Actualmente, la Universidad del Valle no cuenta con un sistema que permita el tratamiento del agua residual generada dentro de la institución, teniendo en cuenta este panorama y la falta de información oficial sobre las características del agua residual de campus universitarios se planteó la evaluación del tratamiento del agua residual por medio un sistema de Laguna Algal de Alta Tasa (LAAT), debido a que es una tecnología prometedora que presenta bajos costos

en operación y mantenimiento, y a su vez genera biomasa que permite darle un valor agregado al agua residual (Cerón et al., 2015).

El presente documento recopila los resultados obtenidos durante la evaluación a escala piloto de una LAAT acoplada a un sistema para el tratamiento del agua residual generada en el Campus Universitario Meléndez de la Universidad del Valle. Durante la investigación se realizaron mediciones diarias en los puntos de entrada, intermedio y salida durante 7 semanas de los parámetros: pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, potencial de oxido-reducción, amonio, nitrato, alcalinidad, fosfatos, nitrógeno total Kjeldahl, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, carbono orgánico disuelto, sólidos suspendidos totales, coliformes fecales, *Escherichia coli* y huevos de helminto. Con base en los resultados obtenidos, la LAAT presentó porcentajes de disminución de materia orgánica superiores al 48% a excepción de los sólidos suspendidos totales, permitiendo establecer que la tecnología es potencialmente aplicable para el tratamiento del agua residual de campus universitarios con un potencial uso de biomasa en lugares donde se presentes condiciones tropicales.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Los grandes cambios generados al ambiente por las actividades humanas son una de las principales preocupaciones de la sociedad actual, el calentamiento global del planeta, la destrucción de la capa de ozono, la sobrepoblación, la escasez del agua, la contaminación de suelos, ríos y mares son algunos de los problemas que se presentan hoy en día. Actualmente, la sociedad se ha comenzado a enterar de la necesidad de detener o revertir la destrucción de los ecosistemas, debido a que estos están llegando o ya sobrepasaron su capacidad máxima de auto limpieza y regeneración. Uno de los principales propósitos de las IES es promover la investigación que permita la generación de nuevo conocimiento orientado a resolver problemáticas ambientales (Galarza, 2014).

Información reportada por el Ministerio de Educación Nacional en mayo de 2016, evidenció que Colombia contaba con aproximadamente 270 IES de las cuales 78 correspondían al sector oficial y 192 al sector privado (MEN, 2016). Las IES producen agua residual con características variadas debido a la cantidad de estudiantes que albergan y la infraestructura con la que disponen (restaurantes universitarios, centros deportivos, laboratorios, etc.), contribuyendo significativamente a la producción nacional de agua residual. Actualmente, la información oficial sobre el tratamiento del agua residual proveniente de campus universitarios es escasa, se encuentran pocos estudios como el realizado por Winanti (2018) en el cual se determinó el potencial de humedales artificiales realizando mediciones de parámetros como: pH, Sólido Suspendido Total (SST), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), aceites y grasas, nitrógeno y fósforo. Durante la investigación, el análisis del efluente mostró una disminución en el pH de 8.15 a 7.00, mientras que otros parámetros contaminantes disminuyeron como SST (57-83%), DQO (85-87%), DBO₅ (85-88%), aceites y grasas (85 -90%), nitrógeno total (91-97%) y fósforo total (97-99%).

Una de las universidades en Colombia comprometidas con el ambiente es la Universidad Autónoma de Occidente (UAO), la cual trata el agua residual generada al interior del campus universitario por medio de PTAR que funciona de manera continua y con mejoras tecnológicas que mitigan impactos ambientales; la PTAR se encuentra conformado por los siguientes componentes: pozo de bombeo 1, tanque de aireación, tanque de sedimentación, pozo de bombeo 2, unidad de filtración y tanque de almacenamiento. Al final del proceso el efluente de la planta cuenta con las condiciones requeridas por la autoridad ambiental para ser descargados a través de la acequia 5 (derivación del río Pance) al río Lili que a su vez conduce el agua al canal Sur que desemboca al río Cauca; para el año 2014 la PTAR de la UAO vertió cerca de 1,959 m³ de agua residual tratada (Holguín, 2015).

La Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) es otra de las IES en Colombia que le realiza un tratamiento al agua residual que se genera al interior de esta, el proceso de tratamiento está constituido por las siguientes unidades: cámara de alivio, desarenador, tanque de aireación y clarificador secundario; los lodos generados en la planta son tratados antes de su disposición final haciendo uso de las siguientes unidades: espesador de lodos, digestor de lodos, filtro de prensa y soplador. Para el año 2012 la PTAR de la UTP trató aproximadamente 29,600 m³ de agua residual (UTP, 2009; UTP, 2013). Así mismo, la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (U.D.C.A) de Bogotá cuenta con una PTAR, la cual posee un digestor anaerobio,

un sistema de lodos activados, una torre de absorción de carbón activado y un proceso de desinfección (MEN, 2013). Para el año 2016 la PTAR de la U.D.C.A trató aproximadamente 2,531 m³ de agua residual (UDCA, 2016).

La Universidad del Valle sede Meléndez acoge alrededor de 14,000 estudiantes, esta concentración de personas produce aproximadamente 640 m³/d de agua residual, valor que asciende considerablemente en temporada de lluvias (Lizcano et al., 2015). Según información suministrada por la Sección de Sostenibilidad y Mantenimiento, la Universidad del Valle actualmente drena el agua residual generada dentro del campus a la red de alcantarillado de la ciudad de Santiago de Cali. La universidad cuenta con 3 puntos de entrega al alcantarillado urbano: efluente final calle 16, efluente final carrera 100 y efluente final servicio de salud de los funcionarios (carrera 86). Como se muestra en la Figura 1, las facultades de: Artes Integradas, Ciencias Naturales y Exactas e Ingeniería y los edificios de: Administración Central, UV TV Emisora, Escuela de Ciencias del Lenguaje y Biblioteca Mario Carvajal drenan hacia el canal colector de la calle 16 de la ciudad de Cali.

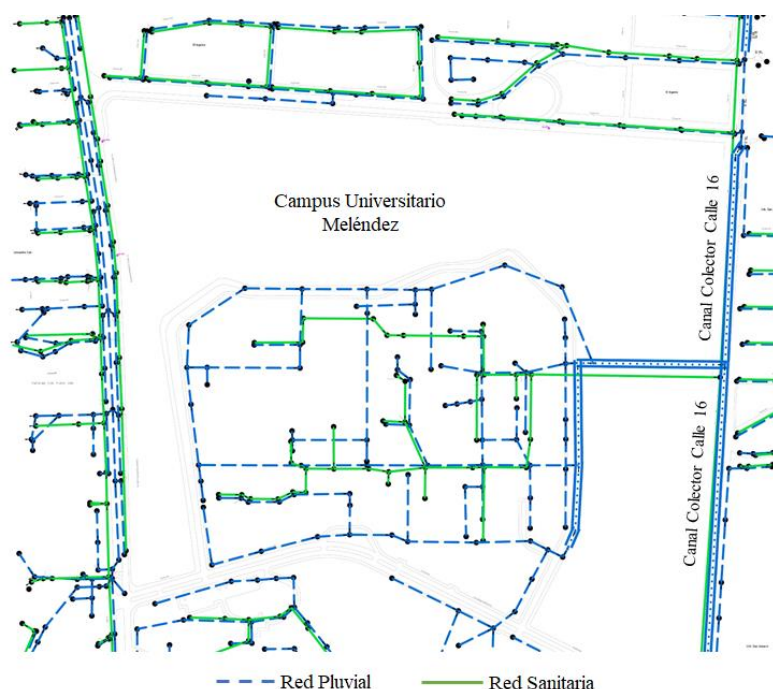


Figura 1. Red de alcantarillado facultades y edificios que drenan hacia el canal colector de la calle 16

Con respecto a las características del agua residual generada por las facultades de: Artes Integradas, Ciencias Naturales y Exactas e Ingeniería y los edificios de: Administración Central, UV TV Emisora, Escuela de Ciencias del Lenguaje y Biblioteca Mario Carvajal, sólo existe un reporte oficial, el cual fue elaborado por la sección de servicios varios de la universidad el día 13 de junio de 2013, donde la empresa Análisis Ambiental realizó una jornada de monitoreo del agua residual generada en el campus Meléndez, dentro de este estudio se evaluaron 2 de los puntos donde la universidad actualmente realiza entrega al alcantarillado urbano: efluente final calle 16 y efluente final servicio de salud de los funcionarios. Con el fin de obtener resultados representativos de las características de los

desechos líquidos generados en la Sede Meléndez, se seleccionó un día normal de funcionamiento y se realizó el monitoreo por un período de seis (6) horas continuas, conformando dos (2) muestras compuestas. La composición de las muestras se realizó mediante alícuotas proporcionales al caudal medido cada treinta (30) minutos (Suarez y Cardona, 2014).

La Tabla 1 y la Tabla 2 consignan los resultados obtenidos del análisis de las muestras recolectadas y de los parámetros medidos en los dos puntos de monitoreo.

Tabla 1. Resultados parámetros medidos en sitio

Fuente: Suarez y Cardona, 2014

Parámetro	Unidad	Efluente final calle 16 – Sede Meléndez	Efluente final servicio de salud – Sede Meléndez
		Min/Max	Min/Max
pH	Unidades de pH	6.73 / 7.05	7.90 / 8.50
Temperatura	°C	26.00 / 28.00	25.00 / 26.00
Caudal	L/s	12.67 / 12.67	0.17 / 0.58

Tabla 2. Resultados análisis de laboratorio

Fuente: Suarez y Cardona, 2014

Parámetro	Unidad	Efluente final calle 16 – Sede Meléndez	Efluente final servicio de salud – Sede Meléndez
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg O ₂ /L	100.6	456.3
Demanda Química de Oxígeno	mg O ₂ /L	161.6	820.5
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	147.5	255.0
Grasas y Aceites	mg/L	7.7	57.6
Cloruro	mg Cl/L	204.0	142.0
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /L	< 4.0	< 4.0
Manganeso	mg Mn/L	< 0.066	< 0.066
Hierro	mg Fe/L	1.0	0.524
Plata	mg Ag/L	< 0.01	< 0.01
Cobre	mg Cu/L	< 0.046	< 0.46
Cromo Total	mg Cr/L	< 0.01	< 0.01
Cadmio	mg Cd/L	< 0.006	< 0.01
Níquel	mg Ni/L	< 0.054	< 0.054
Plomo	mg Pb/L	< 0.01	< 0.01
Zinc	mg Zn/L	0.019	0.028
Mercurio	mg Hg/L	< 0.0019	< 0.0019
Vanadio	mg V/L	< 0.082	< 0.082
Aluminio	mg Al/L	< 1.0	< 1.0
Boro	mg/L	0.009	< 0.002
Cobalto	mg Co/L	< 0.012	< 0.012
Arsénico	mg As/L	< 0.105	< 0.015
Selenio	mg Se/L	< 0.18	< 0.18
Detergentes	mg LAS/L	3.22	12.0
Hidrocarburos Totales	mg/L	9.9	7.63
Fenoles	mg/L	< 0.040	< 0.040
Cianuro Total	mg CN/L	< 0.20	< 0.20
Fosfatos	mg PO ₄ /L	11.2	10.7
Organoclorados	mg/L	< 0.0018	< 0.0018
Organofosforados	mg/L	< 0.002	< 0.00002
Sulfuros	mg/L	< 0.6	1.60
Molibdeno	mg Mo/L	< 0.1	< 0.1

Fluoruros	mg F/L	0.3	0.30
Bario	mg Ba/L	< 0.102	< 0.102
Estaño	mg Sn/L	< 0.10	< 1.0

El consumo de agua del campus universitario Meléndez para el año 2014 fue de 194,252 m³ (Suarez y Cardona, 2014), si este valor se divide entre la cantidad aproximada de estudiantes con la que contaba la sede Meléndez para el segundo semestre de ese mismo año, 12,166 estudiantes (UV, 2014), se obtendría un valor aproximado de la dotación por estudiante de 15.97 m³/estudiante×año (43.75 L/estudiante×día). Es importante resaltar que dicha cantidad de agua llega a la red de alcantarillado con una calidad de la cual no se tiene mayor información a excepción de lo registrado por la sección de servicios varios.

Entre los propósitos del Plan Estratégico de Desarrollo 2015-2025 de la Universidad del Valle, se encuentra el que establece que la universidad, debe fomentar el estudio y el enriquecimiento del patrimonio cultural de la Nación y la defensa, valorización y conservación del medio ambiente y el desarrollo de su biodiversidad (UV, 2015); para ello a mediados de 2008 se creó el espacio de construcción de Políticas Ambientales, Plan Universitario del Medio Ambiente (PUMA), con el objetivo de identificar y resolver de manera integral los problemas ambientales que la universidad aporta a su entorno inmediato, para así llegar a construir un campus sostenible (Cardona y Cobo, 2014).

El PUMA considera seis ejes temáticos entre los cuales se encuentran los recursos hídricos, en este eje se espera que, a partir de una nueva cultura del agua, los estudiantes, profesores y trabajadores, hagan un uso racional del recurso hídrico, entendiendo sus usos múltiples y considerando su valor económico, social y cultural. De esta forma, es un compromiso de la Universidad del Valle aportar a los desafíos que tiene la sociedad con el desarrollo de innovaciones tecnológicas y de gestión que contribuyen al uso sostenible del recurso hídrico (Escobar et al., 2009).

Las lagunas algales de alta tasa general un tratamiento efectivo al agua residual debido a los altos porcentajes de disminución de nutrientes que obtienen y los bajos costos de operación y mantenimiento que presentan en comparación con tratamientos convencionales. Adicionalmente, estos sistemas algales general un valor agregado a través de la biomasa de algas, la cual puede ser usada como fertilizante, alimento o como materia prima para la producción de biocombustibles, siendo este último uso el más investigado durante los últimos años. Las ventajas del uso de microalgas se centran en las altas tasas y los requisitos mínimos de crecimiento; sin embargo, los altos costos de capital para la producción de biocombustibles impiden que esta sea una opción económicamente viable, pero cuando se combina con el tratamiento de aguas residuales, puede volverse viable en el futuro (Sutherland et al., 2017).

En este sentido, el presente estudio se centró en la evaluación de una LAAT a escala piloto acoplada a un sistema de tratamiento del agua residual del campus Meléndez de la Universidad del Valle. La investigación hizo parte del proyecto de investigación titulado “Evaluación de un Acople Tecnológico para el Tratamiento de la Aguas Residuales Domesticas y el Potencial Uso de los Subproductos generados Caso de estudios: Campus Universidad del Valle Sede Meléndez” financiado por la Universidad del Valle, a través del proyecto de convocatoria interna No. 4 - 2015.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- Evaluar a escala piloto el desempeño de una Laguna Algal de Alta Tasa acoplada a un sistema de tratamiento del agua residual de la Universidad del Valle, campus Meléndez.

2.2. Objetivos específicos

- Establecer el desempeño de la Laguna Algal tratando el agua residual del campus Meléndez de la Universidad del Valle en términos de la eliminación de materia orgánica expresada como: Demanda Química de Oxígeno, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Carbono Orgánico Disuelto y Sólidos Suspendidos Totales.
- Determinar el desempeño del sistema de Laguna Algal para la eliminación de nutrientes expresados como: Nitrógeno Total Kjeldhal, Amonio, Nitratos y Fosfatos del agua residual del campus Meléndez de la Universidad del Valle.
- Determinar el funcionamiento del sistema de Laguna Algal para la eliminación de contaminación microbiológica expresada como: Coliformes Fecales, E. Coli y Huevos de Helmintos del agua residual del campus Meléndez de la Universidad del Valle.
- Estimar la productividad algal (Volumétrica y por Área) de la LAAT acoplada a un sistema que trata el agua residual del campus Meléndez de la Universidad del Valle.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Agua Residual

El agua residual es aquella cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas o causas naturales y que por su calidad requiere un tratamiento previo, antes de ser reusada, vertida a un cuerpo natural de agua o descargada al sistema de alcantarillado (OEFA, 2014). El agua que proviene de los sistemas de abastecimiento de una población, después de ser alterada por las diferentes actividades de los seres humanos (domésticas, industriales, agroindustriales, comerciales, entre otros) deben ser tratadas antes de disponerlas.

El agua residual puede clasificarse en diferentes tipos de acuerdo con la actividad de procedencia, entre dicha clasificación es posible encontrar el agua residual doméstica, la cual proviene de áreas residenciales (incluyen residuos provenientes de cocinas, baños, lavado de ropa y drenaje de pisos) y comerciales, incluidas instituciones y zonas recreativas; esta agua se encuentra compuestas principalmente por residuos humanos que llegan a las redes de alcantarillado por medio de descargas hidráulicas. La composición en peso del agua residual doméstica se estima de la siguiente manera: 99.9% de agua y 0.1% de sólidos suspendidos, coloidales y disueltos, siendo el 0.1% la fracción que presenta los mayores problemas a la hora del tratamiento y disposición final (Díaz et al., 2012).

En el caso de la Universidad del Valle, el agua residual que se genera dentro de la instalación incluye agua residual de laboratorio la cual depende principalmente de las actividades que se realicen dentro del mismo (prácticas, investigación, prestación de servicios externos, etc.) y del uso de sustancias químicas que alteren la composición esencial del agua. La Universidad del Valle actualmente cuenta con 59 laboratorios en la Facultad de Ciencias y 109 en la Facultad de Ingeniería, los cuales pueden clasificarse como: laboratorios de ensayo (equipados con diferentes instrumentos de medición o equipos que realizan análisis) y laboratorios de prácticas académicas (lugar donde los estudiantes realizan prácticas y experimentos) (López, 2014). A 2007 la demanda total de agua de la universidad se encontraba alrededor de 8.75 L/s, de la cual el 0.96 L/s (aproximadamente el 11%) era utilizada por los laboratorios (Feijoo y Perea, 2014).

Uno de los principales problemas que se tiene al momento de buscar información sobre las características de los efluentes que se generan en los laboratorios de la Universidad del Valle es la poca información documentada que se encuentra, lo que dificulta el estudio de este tipo de efluentes.

3.2. UI GreenMetric

El UI GreenMetric University Sustainability Ranking es un programa que se creó en abril 2010 bajo el liderazgo de la Universidad de Indonesia, que tiene como objetivo principal generar un compromiso de las universidades alrededor del mundo en temas de medio ambiente y sostenibilidad de campus. Su metodología de calificación se desarrolla bajo tres dimensiones

generales: Medio Ambiente, Economía y Equidad; para el desarrollo del Ranking se han establecidos los siguientes indicadores: entorno e infraestructura, energía y cambio climático, gestión de residuos, uso del agua, gestión de la movilidad y educación ambiental (UI Greenmetric, 2015b).

Desde el año 2011 hasta el 2015, se evidenció un incremento en la cantidad de universidades colombianas que participaron en el ranking GreenMetric. A pesar de ello, el país solo alcanzó un 3.03% total de participación frente a la cantidad total de universidades en el mundo. El promedio general de participación de las universidades colombianas durante los cuatro años correspondió al 2.01%. Para los registros de los años 2011 y 2012, solo participaron las universidades Nacional, Los Andes e Industrial de Santander. En el año 2013, se sumaron las universidades de Cartagena, de Santander y Tecnológica de Pereira, finalmente en el año 2014, participaron once universidades, a la lista anterior se sumaron las universidades Jorge Tadeo Lozano, El Bosque, del Norte de Barranquilla, Autónoma de Occidente y la Escuela de Administración, Finanzas y Tecnología (Sanabria et al., 2016). Para el año 2017, el ranking contó con 619 universidades de las cuales 31 eran colombianas, 11 del sector público y 20 del sector privado (UI Greenmetric, 2015a).

3.3. Laguna Algal de Alta de Alta Tasa

Una LAAT es considerada un sistema que se fundamenta en la oxidación de la materia orgánica gracias a la oxigenación fotosintética realizada por las microalgas presentes en el sistema, las cuales son impulsadas por la energía solar y el dióxido de carbono (CO₂) disuelto en el agua derivado principalmente de la mineralización de la materia orgánica llevada a cabo por la comunidad microbiana presente (Godos et al., 2010). Las microalgas posteriormente liberan oxígeno por fotosíntesis el cual es utilizado por las bacterias, que además mineralizan nutrientes como nitrógeno y fósforo, aunque también se produce asimilación de la biomasa microalgal con lo que se consigue un proceso de reciclaje de nutrientes. El sistema se denomina de alta tasa debido a que presenta mejoras en aspectos como rendimiento o productividad de la biomasa y capacidad de tratamiento del agua residual, en comparación con lagunas facultativas, debido a que el tiempo de retención celular es mayor que el tiempo de retención hidráulico (Cerón et al., 2015).

La Tabla 3 y la Figura 2 evidencian las principales características de sistemas algales de alta tasa.

Tabla 3. Principales características de las lagunas algales de alta tasa
Fuente: Cerón et al., 2015

Características	Unidad
Profundidad	0.2-1 m
Largo	2-3 m
Forma	Abierta y circular
Tipo de Mezcla	Mezcla completa continua
Tiempo de residencia hidráulico	2-8 días
Tiempo de residencia celular	4-13 días
Implementación-usos	Aguas residuales municipales, industriales y agrícolas
Energía	Luz solar

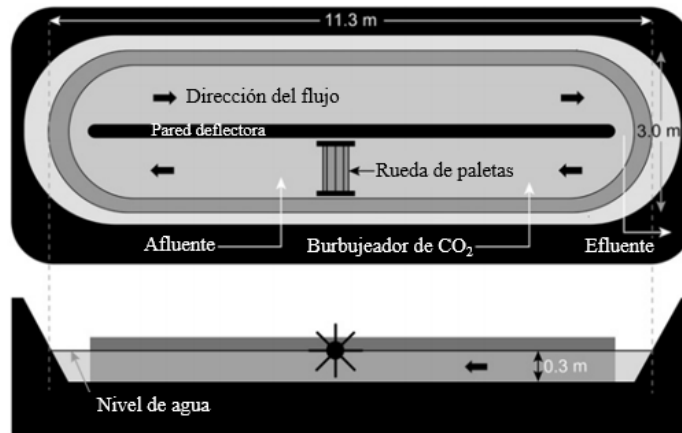


Figura 2. Esquema general LAAT
Fuente: Cerón, 2014

Los sistemas de lagunas algales de alta tasa se han utilizado generalmente para el tratamiento de agua residual municipal, industrial y agrícola; estos sistemas se ven afectados por el ritmo diurno (funcionamiento sujeto a la luz solar y la actividad fotosintética de las algas en la mezcla y en la columna de agua) lo cual causa variaciones en la concentración oxígeno disuelto (OD) y el pH durante el día. La concentración de OD y el pH pueden alcanzar un pico máximo al mediodía y por el contrario en la noche pueden alcanzar valores muy bajos, reportándose períodos anóxicos en la noche, mientras que la concentración de OD al mediodía puede fácilmente sobrepasar los 20 mg/L (Cerón et al., 2015).

Un sistema algal de alta tasa, permite la depuración del agua residual y la producción de biomasa cosechable, debido a que esta unidad es impulsada por la energía solar y el CO₂ disuelto en el agua (procedente especialmente de la mineralización de la materia orgánica a cargo de la comunidad bacteriana presente en el agua residual), lo que permite reunir los beneficios de los sistemas naturales de depuración con la mínima inversión y una notable reducción del espacio (Fructuoso, 2015).

Debido a la preocupación que existe actualmente en cuanto a la búsqueda de fuentes de energías alternativas, que en cierta forma sustituyan o complementen al petróleo y dado el pronóstico del agotamiento de las reservas del planeta y los problemas derivadas de su uso; la investigación actual en microalgas se encuentra mayoritariamente centrada en la obtención de cultivos con alto contenido de lípidos que permitan la producción de biodiesel (Soriano, 2014).

Gran variedad de especies de microalgas pueden ser inducidas, mediante la manipulación de las características fisicoquímicas del medio de cultivo, para la producción de altas cantidades de lípidos o ácidos grasos que posteriormente podrán ser utilizados para la producción de biodiesel. Sin embargo, las microalgas con alto contenido lipídico no presentan altas velocidades de crecimiento, por tal razón lo que se busca es optimizar la producción neta de lípidos por unidad de volumen de reactor o de superficie ocupada (Soriano, 2014).

3.4. Tratamiento de Agua Residual por Medio de Lagunas Algales

El tratamiento del agua residual por medio de lagunas algales de alta tasa, permite la estabilización de este tipo de agua haciendo uso de estanques o lagunas con un crecimiento de algas y una producción de oxígeno alto, mediante una elevada tasa fotosintética, permitiendo un ambiente favorable para que las bacterias realicen la degradación de la materia orgánica. Esta clase de lagunas se establecen preferiblemente en sitios donde la irradiación solar es constante con el propósito de obtener una alta tasa fotosintética por parte de las microalgas presentes. Además del tratamiento biológico, la biomasa algal tiene un uso potencial como alimento, fertilizantes o biofertilizantes, adicional a esto, las algas contribuyen en la captación de CO₂ presente en el medio ambiente (Cerón, 2014).

Aguirre et al. (2011) reportaron el uso de LAAT para el tratamiento de agua residual proveniente de criaderos de cerdos, durante la investigación se alcanzaron porcentajes de disminución de la demanda química de oxígeno superiores al 90%. Por su parte, Hamouri et al. (1994) emplearon sistemas algales para tratar agua residual encontrando eficiencias de disminución de la demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno amoniacal y fosfatos del 88, 69 y 52% respectivamente. Adicionalmente, se reportaron disminuciones de coliformes fecales, *Salmonella sp.* y una completa eliminación de huevos de helmintos, en particular de *Ascaris sp.* y *Trichuris sp.* (Cerón et al., 2015).

En el tratamiento del agua residual las lagunas algales de alta tasa con adición de CO₂ podrían proporcionar un tratamiento terciario o avanzado rentable y eficiente con el beneficio conjunto de la producción de biomasa algal para el uso de biocombustible. La biomasa algal cultivada puede tener un contenido lipídico del 10-30% (peso seco), que podría usarse para producir biodiesel. Park y Craggs (2011) realizaron una investigación en Nueva Zelanda a mediados del verano (noviembre-enero) sobre la producción de biomasa algal y lípidos totales en el tratamiento del agua residual mediante dos lagunas algales de alta tasa (LAAT este y LAAT oeste) a escala piloto (TRH= 4 días) con y sin adición de CO₂. La producción de biomasa (algal/bacterias) en la LAAT del este (15.2 g/m²×d) fue mejor en comparación con la LAAT del oeste (10.6 g/m²×d); el contenido de lípidos de la biomasa cultivada en ambas lagunas se redujo ligeramente (de 25% a 20%) con la adición de CO₂ y se observó un contenido máximo de lípidos del 40% en la LAAT del oeste cuando la concentración de nitrógeno amoniacal era baja (< 0.5 mg/L) y un valor de pH máximo (>10). El contenido total de lípidos de la biomasa aumentó en un 15% en condiciones limitantes de nitrógeno, sin embargo, la producción global de biomasa se redujo a la mitad durante el periodo donde el nitrógeno fue limitado.

Recientemente, el empleo de microalgas como fuente de energía renovable ha sido objeto de estudio en la comunidad científica alrededor del mundo, debido a que de estas es posible extraer aceite para la producción de biodiesel ofreciendo una alternativa para la solucionar la futura crisis energética que sucederá como resultado del agotamiento de los combustibles fósiles. Para el desarrollo de la tecnología de producción de biodiesel a partir de microalgas es necesario seleccionar la especie más adecuada. Montero et al. (2012) estudiaron cinco cepas de microalgas a las cuales se les determinó la productividad de biomasa y lípidos totales seleccionando la microalga *Chlorella vulgaris* por presentar un elevado contenido lipídico en su estructura además de evidenciar la mayor productividad de biomasa (0.15 g/L×d) y de lípidos (42 mg/L×d) del total de cepas estudiadas.

3.4.1. Parámetros Ambientales que Inciden en el Crecimiento Algal

3.4.1.1. Energía Lumínica

La luz proporciona toda la energía necesaria para que la comunidad microalgal presente en los sistemas de lagunas algales puedan realizar la fotosíntesis, este parámetro es uno de los principales condicionantes del funcionamiento general de estos sistemas. El aumento de la radiación solar directa afecta a las microalgas presentes en el medio, hasta el extremo de alcanzar el punto de compensación de luz y en otros casos la fotoinhibición afectando de manera negativa los receptores de luz de las algas y produciendo una disminución en la tasa fotosintética y la productividad. Por su parte, los sistemas abiertos como las LAAT permiten que la distribución de la radiación solar se presente de manera uniforme gracias a la mezcla y el crecimiento en densidad que en ellas se presenta, disminuyendo la ocurrencia de la fotoinhibición en el sistema. El efecto sombreado que genera la biomasa algal hace que en los primeros 0.15 m (generalmente se construyen a una profundidad de 0.3 m) de las LAAT no penetre la luz disponible, dejando el resto del estanque a oscuras. Sin embargo, los flujos turbulentos, resultantes del flujo de agua alrededor de la laguna y de rueda de paletas de mezclado (o burbujeo artificial), proporcionan un grado de mezcla vertical a través de la profundidad del estanque, asegurando que la biomasa algal este expuesta a luz (Cerón et al., 2015).

3.4.1.2. Temperatura

Los organismos presentes en sistemas acuáticos pueden verse influenciados por la temperatura del agua debido a que esta afecta la química y las reacciones biológicas de estos individuos. La temperatura puede alterar el equilibrio iónico (pH) del agua presente en la laguna, así como la solubilidad del gas (oxígeno y CO₂), sin embargo, las diferentes especies de algas pueden responder a estos cambios en diferentes grados (Park et al., 2011).

La producción algal aumenta proporcionalmente con la temperatura hasta alcanzar la temperatura óptima de cada especie, por encima de esta, aumenta la respiración y la fotorrespiración disminuye la productividad global. La temperatura optima medida bajo condiciones de máxima tasa de crecimiento algal (presencia suficiente de nutrientes y condiciones ideales de luz) varía dependiendo de la especie, pero es frecuente encontrarla entre 28 y 35°C, aunque puede variar con la composición del medio de cultivo, las especies o la cepa cultivada (Park et al., 2011).

3.4.1.3. pH

Los procesos bioquímicos (disponibilidad de CO₂ para la fotosíntesis, disponibilidad y asimilación de nutrientes en forma de iones, etc.) que se encuentran relacionados con el crecimiento de las algas presentes en sistemas de lagunas algales, pueden verse afectados por el pH del agua (Cerón et al., 2015).

Este parámetro puede afectar la productividad algal, la respiración, la alcalinidad y la composición iónica del medio de cultivo, así como, la actividad microbiana autótrofa y heterotrófica y la eficiencia del sistema si este cuenta con adición de CO₂. Es importante

resaltar que, así como en los otros parámetros, cada especie necesita un rango de pH que permita su crecimiento óptimo, se ha establecido que el pH ideal en agua dulce es de 8 unidades de pH. Por encima o debajo de este, el sistema presenta un descenso en la productividad, lo que afecta no solo el crecimiento algal, sino también la capacidad de remover el nitrógeno en sistemas de tratamientos de agua (Hernández y Labbé, 2014).

3.4.1.4. Oxígeno disuelto

El aumento en la concentración de OD en lagunas algales de alta tasa se encuentra principalmente relacionado con la actividad fotosintética que se realiza durante el día. Esta actividad puede llegar a niveles superiores al 200% y alcanzar concentraciones hasta de 20 mg/L. Este exceso en los niveles de OD puede tener repercusión directa sobre la productividad algal, así como promover la oxidación bacteriana y afectar en ocasiones el tratamiento del agua residual. No obstante, se necesitan realizar más investigaciones sobre LAAT para determinar el efecto del OD sobre la productividad y tratamiento del agua residual (Gutiérrez, 2012; Cerón et al., 2015).

3.4.1.5. Nutrientes

Las distintas formas de nitrógeno son los nutrientes requeridos por las algas para su crecimiento en sistemas de LAAT, por tanto, estos compuestos son un nutriente crítico, que permite regular el contenido de lípidos presentes en las células algales. Generalmente, las microalgas tienen un contenido lipídico aproximadamente del 20%, pero cuando el nitrógeno se convierte en el factor limitante del crecimiento, la acumulación de los niveles de lípidos aumenta en más de 40%. Sin embargo, usando la limitación de nitrógeno para estimular la acumulación de lípidos en las células de algas, a menudo reduce la producción de estas, lo que sugiere que las 2 condiciones, alto contenido en lípidos y alta productividad, pueden ser mutuamente excluyentes (Hernández y Labbé, 2014).

El fósforo es fundamental en muchos procesos celulares, tales como la formación de ácidos nucleicos y transferencia de energía. Aunque el contenido en fósforo de las microalgas es menor al 1%, su deficiencia en el medio de cultivo es una de las mayores limitaciones de crecimiento. En los medios de cultivo suele incorporarse en forma de HPO_4^{2-} o HPO_4^- (Hernández y Labbé, 2014).

3.5. Legislación Colombiana

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible presentó en el 2015 la Norma de Vertimientos Puntuales a Cuerpos de Aguas Superficiales y Sistemas de Alcantarillado Público (Resolución No. 0631), con el propósito de reducir y controlar las sustancias contaminantes que llegan a los ríos, embalses, lagunas, cuerpos de agua naturales o artificiales y sistemas de alcantarillado público, para de esta forma, aportar al mejoramiento de la calidad del agua y trabajar en la recuperación ambiental de las arterias fluviales del país (MADS, 2015). La Resolución No. 0631 de 2015 presenta las definiciones de agua residual doméstica y agua residual no doméstica, teniendo en cuenta que el agua residual generada dentro del campus Meléndez de la Universidad del Valle incluye agua residual de laboratorios, se podría clasificar como agua residual no doméstica. La Resolución No. 0631 de 2015 establece en el

Capítulo VIII (Artículo 16) los parámetros fisicoquímicos y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de agua residual no doméstica – ARnD al alcantarillado público. En el marco de esta investigación, el efluente de la LAAT deberá cumplir con los límites máximos permisibles para cada parámetro establecidos en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores límites máximos permisibles de vertimientos que descargan a un alcantarillado público

Fuente: Resolución No. 0631 de 2015

Parámetro	Unidad	Valor Límite Máximo Permissible
Temperatura	°C	≥ 40
pH	Unidades de pH	5-9
Demanda Química de Oxígeno	mg O ₂ /L	225
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg O ₂ /L	75
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	75
Fósforo Total	mg/L	Análisis y reporte
Nitratos	mg/L	Análisis y reporte
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	Análisis y reporte
Nitrógeno Total	mg/L	Análisis y reporte
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /L	Análisis y reporte

La máxima autoridad ambiental (DAGMA) y la empresa prestadora de servicios públicos (EMCALI) en el municipio de Santiago de Cali, actualmente no cuentan con normativas propias para la ciudad relacionada con los vertimientos puntuales de agua residual sobre el alcantarillado. Para el caso puntual de la Universidad del Valle, el DAGMA podrá efectuar en cualquier momento monitoreo y verificación de todos los parámetros ambientales, mientras que EMCALI podrá solicitar la caracterización fisicoquímica de los vertimientos líquidos.

Si se pensara en reusar el efluente que sale de la LAAT, sería pertinente tener en cuenta la Resolución No. 1207 emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el 2014, la cual establece las disposiciones relacionadas con el uso de agua residual tratada. Dentro de las instalaciones de la Universidad del Valle sede Meléndez, el agua tratada por LAAT podría ser destinada para uso agrícola, especialmente para riego de zonas verdes y jardines. Con base en lo anterior, la Resolución No. 1207 de 2014 establece en el Artículo 7 los criterios de calidad de acuerdo con los usos establecidos para el agua residual tratada. En el marco de esta investigación, el efluente de la LAAT deberá cumplir con los valores límites máximos permisibles para cada parámetro establecidos en la Tabla 5.

Tabla 5. Criterios de calidad para el uso de agua residual tratada en zonas verdes y jardines

Fuente: Resolución No. 1207 de 2014

Parámetro	Unidad	Valor Límite Máximo Permissible
pH	Unidades de pH	6-9
Conductividad	µS/cm	1,500
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	1 × 10 ⁴
Helminths parásitos humanos	Huevos y Larvas/L	1
Nitratos	mg/L	5

4. METODOLOGÍA

4.1. Zona de Estudio

El presente estudio se realizó en el marco del proyecto de investigación titulado “*Evaluación de un Acople Tecnológico para el tratamiento de la Aguas Residuales Domésticas y el Potencial Uso de los Subproductos Generados. Caso de Estudio: Campus Universidad del Valle Sede Meléndez*”, financiado por la Universidad del Valle a través de la convocatoria interna de proyectos de investigación 2015. El acople tecnológico a escala piloto se ubicó en la zona de prototipos del edificio 335 del campus Universitario Meléndez de la Universidad del Valle, localizada en la ciudad de Santiago de Cali, departamento del Valle del Cauca ($3^{\circ}22'38.93''$ N y $76^{\circ}31'57.98''$ O) (Figura 3). El acople tecnológico funcionó las 24 horas del día, durante un periodo de 7 semanas y con un caudal de diseño de 50 L/d.

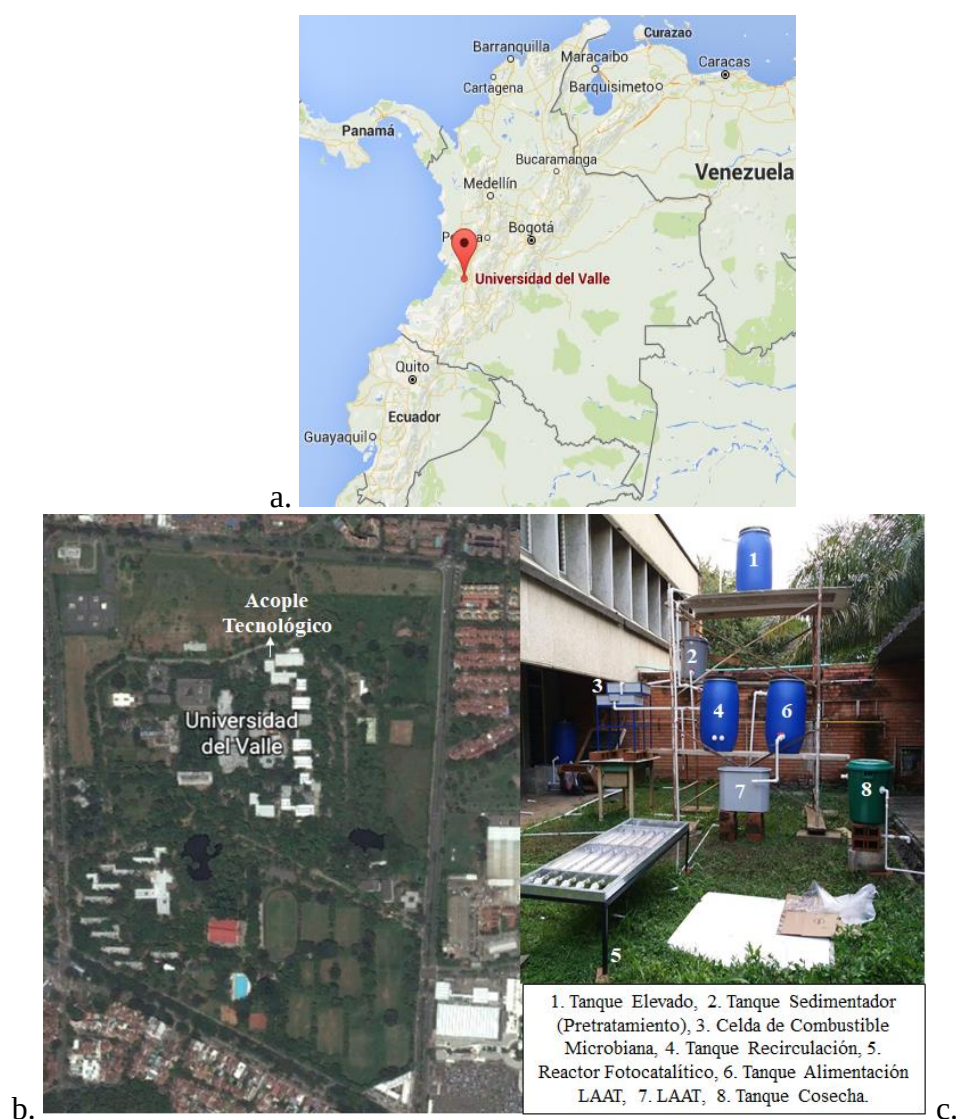


Figura 3. Localización del Sistema de Tratamiento. **a.** Ubicación Universidad del Valle, **b.** Localización del acople tecnológico, **c.** Acople tecnológico

4.2. Acople Tecnológico Laguna Algal de Alta Tasa

La Figura 4 evidencia un esquema general del acople tecnológico implementado para el tratamiento del agua residual de la Universidad del Valle sede Meléndez. El sistema a escala piloto estuvo compuesto por las siguientes unidades: Tanque de Sedimentación, Reactor Fotocatalítico y Laguna Algal de Alta Tasa.

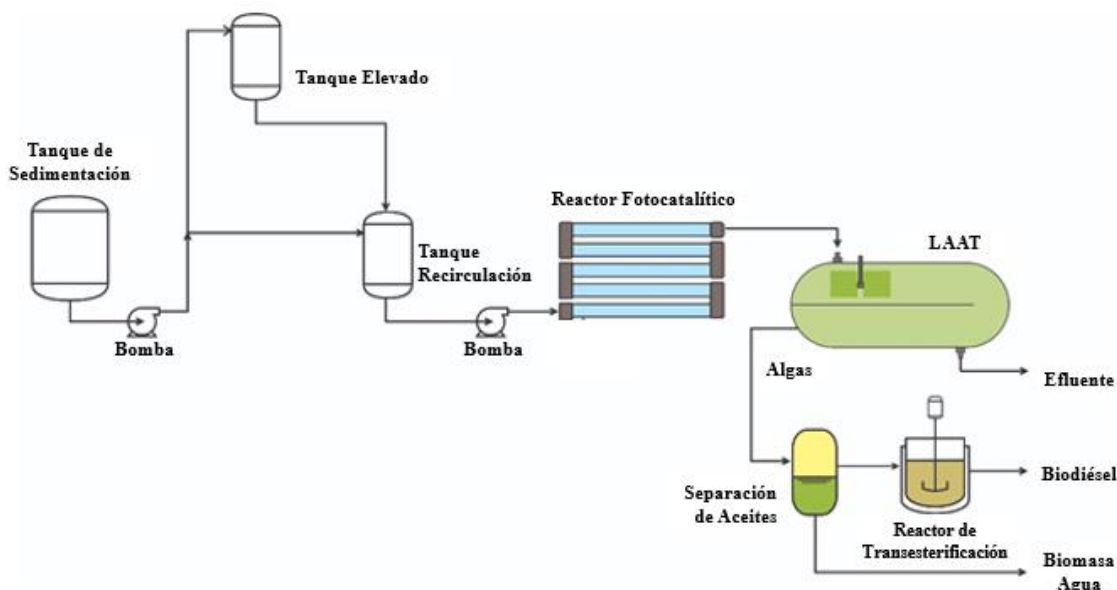


Figura 4. Esquema general del acople tecnológico a escala piloto

El acople tecnológico contempló tres etapas fundamentales: un proceso de sedimentación, para la simulación de una celda de combustible microbiana en términos de disminución de materia orgánica, seguido por un proceso de fotocátalisis heterogénea que preparó el efluente para el cultivo de microalgas con el propósito de extraer omega 3, 6 y 9 y, a su vez, triglicéridos para la producción de combustibles de tercera generación.

La Tabla 6 muestra las características más relevantes del acople tecnológico.

Tabla 6. Sitio, Frecuencia y Variables Fisicoquímicas a medir en la LAAT

Unidad de Tratamiento	Largo (m)	Ancho (m)	Diámetro (")	Profundidad (m)	Volumen (m ³)	Área (m ²)	Caudal (L/d)	Tiempo de Retención (d)	Tiempo de Exposición al Sol (min)
Tanque de Sedimentación	NA	NA	22.91 ¹ 18.50 ²	0.99	220	NA	NA	2	NA
Reactor Fotocatalítico	1.50	NA	1.50	NA	50	4.57	50	NA	3.6
LAAT	0.70	0.30	NA	0.40	0.054	0.25	50	1	NA

En la Figura 5 se muestra el sistema algal de alta tasa que se evaluó en el marco de esta investigación.

¹ Diámetro del tanque

² Diámetro de la boca del tanque



Figura 5. Sistema Laguna Algal de Alta Tasa

4.3. Agua Residual Universidad del Valle

El agua residual tratada por el acople tecnológico fue extraída de la cámara de inspección ubicada entre los edificios 340 (Escuela de Ingeniería Mecánica) y 341 (CINARA) por medio de una electrobomba sumergible RX 2 VORTEX (ver Figura 6 y Figura 7); a esta cámara llegan las descargas provenientes de los edificios Tulio Ramírez¹, El Cree³, Torre de Ingeniería¹¹, CINARA⁹ y EIDENAR¹⁰, la biblioteca Mario Carvajal⁴ y las escuelas de ciencias del lenguaje², ingeniería química⁵, ingeniería de los recursos naturales y del ambiente⁶, ingeniería de alimentos⁷ e ingeniería mecánica⁸ (ver Figura 8). La zona que drena el agua residual a la cámara mencionada anteriormente cuenta con 28 laboratorios y dos cafeterías. La extracción del agua residual se realizó los días lunes, miércoles y viernes entre las 12:00 m. y las 2:00 p.m. con el propósito de contar con el tiempo suficiente para realizar la simulación de la celda de combustible microbiana (proceso de sedimentación por 2 días) y contar con el tiempo suficiente para realizar las pruebas de laboratorio.



a. b.
Figura 6. Localización cámara de inspección. **a.** Cámara de inspección ubicada entre los edificios 340 y 341. **b.** Cámara de inspección



a. b.
Figura 7. Sistema implementado para la extracción del agua residual. **a.** Electrobomba sumergible RX 2 VORTEX. **b.** Montaje electrobomba



Figura 8. Esquema red de alcantarillado Universidad del Valle

4.4. Estabilización y Puesta en Marcha del Sistema de Laguna Algal de Alta Tasa

Para el arranque de la LAAT, se llenó la unidad a escala piloto con agua residual previamente sedimentada y tratada por el fotorreactor, hasta alcanzar una altura aproximada de 0,20 m con respecto al fondo de la unidad de tratamiento, después se adicionaron 6 L de inóculo con un consorcio de microalga (*Parachlorella Kessleri*) – bacteria, y finalmente se completó el llenado de la laguna con agua residual tratada hasta conseguir una profundidad de 0,30 m (salida de la unidad). La Figura 9 evidencia el proceso de arranque de la LAAT.

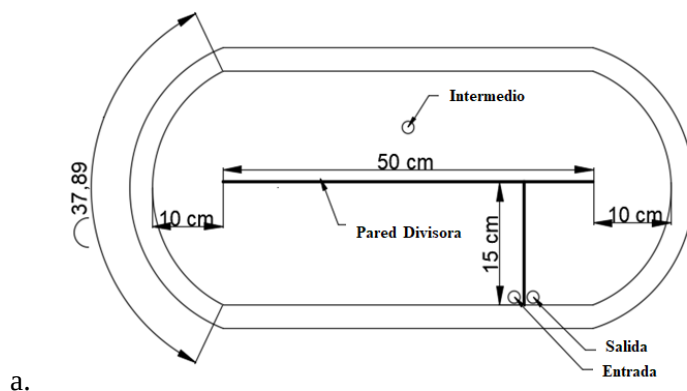
Durante 5 semanas se realizaron conteos (2 veces por semana, 4 conteos por día) del número de células haciendo uso de una cámara de Neubauer y un microscopio invertido Nikon Eclipse TS100, con el propósito de evidenciar el comportamiento del sistema en el tiempo, durante esta fase de arranque la laguna operó en batch. Es importante aclarar que el consorcio de *Parachlorella Kessleri* (microalga) – bacteria que fue adicionado a la laguna se encontraba en su fase de crecimiento exponencial, la determinación del tiempo de incubación requerido por *Parachlorella Kessleri* para alcanzar su fase exponencial fue estudiada en la tesis de pregrado “Evaluación del consorcio natural alga (*Parachlorella Kessleri*) (*Chlorophyceae*) - bacteria en depuración de aguas residuales sintéticas” (Darwich, 2017). Los conteos de células de microalgas se realizaron en el laboratorio de Fisiología Vegetal de la Universidad del Valle.



Figura 9. Proceso de arranque Laguna Algal de Alta Tasa. **a.** Laguna Algal de Alta Tasa Instalada, **b.** Adición del inoculo de *Paracholrella Kessleri*, **c.** Montaje final Laguna Algal de Alta Tasa

4.5. Puntos de Muestreo

Una vez la laguna se encontró llena y lista para el arranque, se establecieron los puntos de muestro los cuales dependían del parámetro a evaluar y la frecuencia con la cual se realizarían las mediciones. La Figura 10 evidencia un esquema general de los puntos de monitoreo los cuales fueron: entrada al sistema, salida del sistema y punto intermedio de la laguna de acuerdo con el sentido del flujo del agua.



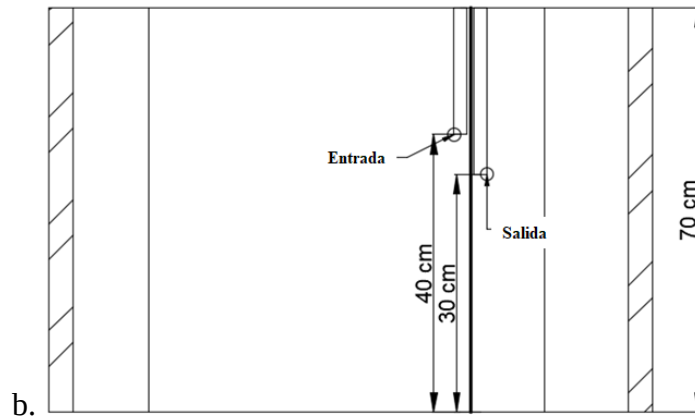


Figura 10. Puntos de muestro Laguna Algal de Alta Tasa. a. Vista en planta LAAT, b. Vista de perfil LAAT

4.6. Variables de Respuesta Físicoquímicas

Para el monitoreo de parámetros físicos y químicos del agua se tomaron muestras en los puntos de entrada, salida e intermedio durante 7 semanas. En la Tabla 7 y la Tabla 8 se detallan los parámetros que fueron evaluados, el equipo o la técnica empleada para el análisis, la frecuencia con la que se realizaron las mediciones y los puntos muestreados.

Tabla 7. Sitio, frecuencia y variables fisicoquímicas medidas en la LAAT

Parámetros	Unidad	Equipo	Frecuencia de medición	Punto de muestreo
Caudal	L/s	Aforo	1/día	Entrada y Salida
pH	Unidades de pH		4/día	Entrada, Salida, Intermedio
Temperatura	°C		4/día	Entrada, Salida, Intermedio
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	Medidor Portátil	4/día	Entrada, Salida, Intermedio
Conductividad Eléctrica (CE)	mS/cm	Multiparamétrico de Calidad del Agua HI	4/día	Entrada, Salida, Intermedio
Potencial de Óxido-Reducción (ORP)	mV	9829 - Hanna Instruments ³	4/día	Entrada, Salida, Intermedio
Amonio (NH ₄ ⁺)	mg/L		3/semana; 2/día	Entrada, Salida, Intermedio
Nitrato (NO ₃)	mg/L		3/semana; 2/día	Entrada, Salida, Intermedio
Alcalinidad	mg/L	Checker HI775 – Hanna Instruments	3/semana; 2/día	Entrada, Salida
Fosfatos (P-PO ₄ ⁻³)	mg/L	Checker HI717 – Hanna Instruments	3/semana; 2/día	Entrada, Salida

³ El equipo se calibró cada día al momento de realizar la primera medición

Tabla 8. Sitio, frecuencia y variables fisicoquímicas medidas en el laboratorio

Parámetros de Laboratorio	Unidad	Standard Methods (2017)	Frecuencia de medición	Punto de muestreo
Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) ⁴	mg/L	4500 N _{org} - B, C	1/semana	Entrada, Salida
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	5220-D	1/semana	Entrada, Salida
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	5210-D	1/semana	Entrada, Salida
Carbono Orgánico Disuelto (COD)	mg/L	5310-B	1/semana	Entrada, Salida
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	2540-D	1/semana	Entrada, Salida

Los horarios de medición de los parámetros según su frecuencia se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Horarios de medición LAAT

Frecuencia de medición	Días de la semana de medición	Horario de medición
4/día	lunes a domingo	8:00 a.m. - 9:00 a.m. 11:00 a.m. - 12:00 m 2:00 p.m. - 3:00 p.m. 5:00 p.m. - 6:00 p.m.
3/semana	lunes, miércoles y viernes	8:00 a.m. - 9:00 a.m.
2/día		2:00 p.m. - 3:00 p.m.
1/semana	viernes	8:00 a.m. - 9:00 a.m.

4.7. Variables de Respuesta Microbiológicas

En los puntos de entrada y salida de la LAAT se tomaron muestras semanales durante el periodo de experimentación para la determinación de las variables microbiológicas (Tabla 10) con base en lo establecido por cada uno de los laboratorios que realizaron los análisis de dichos parámetros.

Tabla 10. Sitio, frecuencia y variables microbiológicas medidas en la LAAT

Parámetros	Unidad	Standard Methods / Método	Frecuencia de medición	Punto de muestreo	Laboratorio
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	9221-B, E	1/semana	Entrada, Salida	Laboratorio de Microbiología Ambiental
Escherichia Coli	NMP/100 mL	9221F	1/semana	Entrada, Salida	Universidad del Valle
Huevos de Helminto	No. Huevos/L	Bailenger	1/semana	Entrada, Salida	Laboratorio CINARA Puerto Mallarino

⁴ Parámetro evaluado por el laboratorio de aguas y residuos ambientales de la Universidad del Valle

4.8. Taxonomía de Microalgas

Para realizar la identificación de las especies de microalgas se tomó en un recipiente plástico una muestra de agua de la mitad de la laguna y se selló el recipiente para evitar contaminación externa, posteriormente la muestra fue transportada hasta el laboratorio de Fisiología Vegetal de la Universidad del Valle en donde se realizó el montaje para analizar la muestra; este consistió en adicionar una gota de muestra y una gota de medio de fijación (gelatina fenolizada) en una placa porta-objetos, mezclar por agitación de forma circular sobre una superficie plana y cubrir con una placa cubre-objetos. La identificación de las células algales se realizó utilizando un microscopio invertido Nikon Eclipse TS100 y siguiendo las guías de taxonomía para microalgas de agua dulce de Comas (1996) y Bicudo y Menezes (2006).

4.9. Estimación de Clorofila *a* y Biomasa Algal

La estimación de la concentración de clorofila *a* se realizó por el método de espectrofotometría. Este método consistió en extraer muestras en recipientes plásticos de la mitad de la laguna en el horario comprendido entre las 6:30 a.m. y las 7:30 p.m. (las muestras fueron extraídas cada hora), al momento de efectuar la toma de muestras se realizó la medición de radiación solar por medio de un radiómetro UV-UVX a una longitud de onda de 365 nm, este equipo fue facilitado por el Laboratorio de Investigación en Catálisis y Procesos. Una vez extraída la muestra el recipiente fue cubierto con papel aluminio para evitar el paso de luz hacia este y depositado en una nevera que mantuviera una temperatura de 4 °C. Finalizada la jornada, las muestras fueron transportadas hasta el laboratorio de Fisiología Vegetal de la Universidad del Valle para ser analizadas en el espectrofotómetro HACH DR 2700 y cuantificar la absorbancia de las muestras a las siguientes longitudes de onda: 645 y 663 nm. Con base en los resultados de absorbancia y teniendo en cuenta la Ecuación 1 se procedió a cuantificar la concentración de clorofila *a* (Ni et al., 2009).

$$\text{Clorofila } a \left(\frac{\mu g}{mL} \right) = (12.7 \times \text{Abs } 663) - (2.69 \times \text{Abs } 645) \quad \text{Ecuación 1}$$

A partir de la concentración de clorofila *a* fue posible estimar la proporción de biomasa algal que se presentó en la LAAT durante la jornada de monitoreo, para ello se utilizó la Ecuación 2 (Park y Craggs, 2010).

$$\text{Biomasa Algal} \left(\frac{mg}{L} \right) = \left[\text{Clorofila } a \left(\frac{mg}{L} \right) \right] \times \frac{100}{1.5} \quad \text{Ecuación 2}$$

4.10. Manejo Estadístico de los Datos

Se realizó un análisis descriptivo de las variables fisicoquímicas y microbiológicas con el propósito de caracterizar el comportamiento de estas a lo largo del estudio en cada uno de los puntos de muestro. El análisis se realizó mediante el uso de medias, gráficos de cajas, dispersión y puntos, las cuales permitieron observar la dinámica del sistema durante el tiempo de estudio.

4.10.1. Evaluación Punto de Medición Variables: DQO, DBO₅ y NTK

Con la finalidad de evaluar el efecto del punto de medición (Entrada y Salida) en cuanto a las variables DQO, DBO₅ y NTK, se empleó un estadístico de prueba Chi-cuadrado asociado a un Modelo Lineal Mixto incluyendo el factor bloque Semana para controlar la posible variabilidad que se pudiera presentar entre mediciones realizadas en distintas semanas y agregando un factor aleatorio para modelar la correlación que presentan las mediciones en una misma semana. El análisis estadístico se llevó a cabo empleando el programa de libre distribución R versión 3.4.0 (R Development Core Team, 2017), determinando diferencias estadísticas a un nivel de significancia del 5%.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1. Características Afluente LAAT

Para el arranque de la LAAT se utilizó agua residual previamente sedimentada y tratada por el fotorreactor, las características del agua residual cruda, sedimentada y tratada se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Características agua residual sedimentada y afluente LAAT

Agua Residual	DQO (mg O₂/L)	COD (mg/L)
Agua residual cruda	276.3	240.8
Agua residual sedimentada	105.9	104.5
Afluente LAAT	25.6	18.4

Teniendo en cuenta lo consignado en la Tabla 11 y la clasificación del agua residual con base en la concentración de materia orgánica realizada por Metcalf y Eddy (2003), se podría establecer que el afluente de la LAAT presentó características de un agua residual diluida, con baja concentración de materia orgánica y posiblemente de difícil degradación debido a la baja carga orgánica con la que entrada a la LAAT. Es probable que el agua residual haya presentado dichas características debido a que la investigación se realizó durante el final del periodo académico, en donde la afluencia de personas en la universidad es menor en comparación con el inicio y mitad del semestre.

Dentro del fotoreactor ocurre un proceso de oxidación avanzada donde el tratamiento del agua residual involucra la generación de radicales intermedios altamente reactivos que por su gran poder oxidante producen cambios en la estructura química de los contaminantes. En este proceso hay una fuerte tendencia a transformar y destruir químicamente los contaminantes, en algunos casos hasta la mineralización, la cual se define como la degradación completa de un compuesto, en donde el carbono orgánico es oxidado hasta CO₂ aumentando su biodegradabilidad (Mena, 2014).

5.2. Curva de Crecimiento Algal

La Figura 11 muestra como durante los primeros cinco conteos se obtuvieron valores promedios del número de células muy variables entre sí, alcanzando un valor máximo aproximado de 803 células×0.1 mL al tercer conteo y un valor mínimo cercano a 307 células×0.1 mL en el segundo conteo. A partir del quinto conteo se evidenció una tendencia decreciente en la cantidad promedio del número de células alcanzando un valor cercano a 83 células×0.1 mL en el décimo conteo, debido a la notable disminución en la cantidad de células se tomó la decisión de colocar a funcionar la LAAT de forma continua.

Villa et al. (2014) establece que las microalgas requieren diferentes factores para su crecimiento, dentro de estos se encuentran los parámetros fisicoquímicos como luz, temperatura, salinidad, pH, CO₂ y fotoperiodo (tiempo de exposición a la luz y oscuridad). Con base en lo anterior, es posible que la disminución en la cantidad de células haya estado relacionada con las condiciones meteorológicas (radiación solar, temperatura, humedad,

lluvia, evapotranspiración) que se presentaron durante el periodo de estabilización. Adicionalmente, el nuevo de sustrato (agua tratada por el fotorreactor) y la cantidad de células adicionadas al momento de realizar la inoculación, posiblemente afectaron el crecimiento de las células algales dentro de la LAAT.

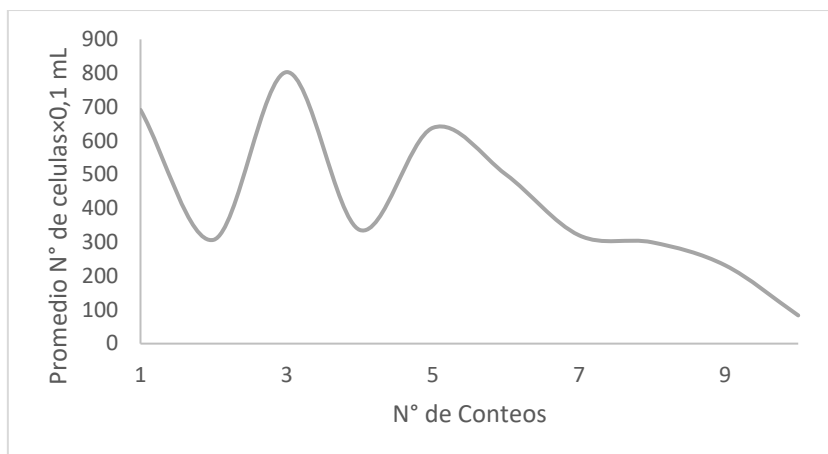


Figura 11. Curva de crecimiento algal fase de arranque

5.3. Variables de Respuesta Físicoquímicas

5.3.1. Parámetros “In Situ”

La Tabla 12 evidencia los resultados obtenidos de la evaluación de los parámetros estudiados durante la fase de experimentación en la LAAT.

Tabla 12. pH, Temperatura, Oxígeno Disuelto (OD), Conductividad Eléctrica (CE), Potencial de Óxido-Reducción (ORP) y Alcalinidad de la LAAT

Punto de Medición	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		OD (mg/L)	
	Min/Max		Media ± s.d.	Min/Max	Media ± s.d.	Min/Max
Entrada	4.32 / 8.31		27.18 ± 2.87	16.55 / 32.13	1.11 ± 1.50	0 / 6.37
Intermedio	4.19 / 8.15		27.50 ± 2.86	13.04 / 33.94	4.74 ± 3.10	0 / 14.58
Salida	4.28 / 8.21		27.27 ± 2.57	14.81 / 32.12	3.86 ± 1.95	0 / 10.65
Punto de Medición	CE (dS/cm)		ORP (mV)		Alcalinidad	
	Media ± s.d.	Min/Max	Media ± s.d.	Min/Max	Media ± s.d.	Min/Max
Entrada	0.013 ± 0.002	0.008 / 0.019	3.71 ± 51.01	-90.10 / 120.60	280.60 ± 71.90	30 / 380
Intermedio	0.011 ± 0.001	0.007 / 0.013	40.10 ± 60.77	-94.10 / 190.80		
Salida	0.010 ± 0.001	0.006 / 0.013	37.19 ± 51.44	-80.00 / 155.60	129.20 ± 68.90	27 / 258

Es importante resaltar que las figuras que se presentaron en cada uno de los parámetros evaluados representan el comportamiento de estos a lo largo de la investigación en los diferentes puntos de medición. La línea dentro de la caja representa el valor de la mediana, la caja representa el recorrido intercuartílico que contiene el 50% de los valores, las líneas continuas paralelas fuera de la caja representan los valores más altos y bajos y los puntos por fuera de las líneas paralelas son datos atípicos.

5.3.1.1. pH

Durante el periodo experimental, se observaron diferencias significativas en los tres puntos de muestreo respecto a los valores mínimos y máximos de pH (ver Tabla 12). Es decir, el medio osciló entre ácido y alcalino. Los puntos intermedio y salida registraron los valores más bajos mientras que la entrada los más elevados durante la fase de estudio. Adicionalmente no se presentaron diferencias notables entre el punto intermedio y la salida (ver Figura 12) lo que muestra que una vez el pH del agua cambió, este se mantuvo constante dentro del sistema algal.

De la Figura 12 también se observa que durante las primeras semanas de experimentación se evidenciaron variaciones notables de pH, las cuales posiblemente estuvieron relacionadas con la no estabilidad del sistema. Después de la tercera semana se pudo alcanzar la estabilidad del sistema (oscilación del pH entre 6.5 y 8.5 unidades aproximadamente) encontrándose el pH en algunos momentos dentro del rango (7-9 unidades de pH) que favorece a la mayoría de cultivos de microalgas (Martínez, 2011).

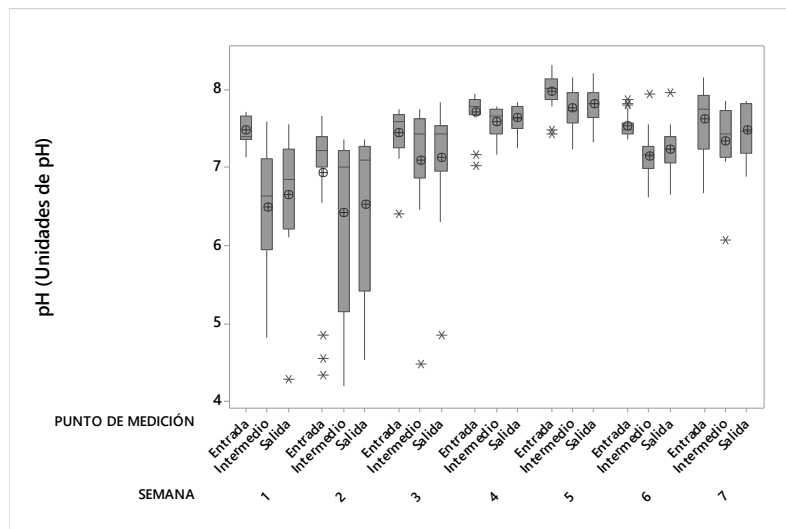


Figura 12. Comportamiento del pH en los puntos de medición durante las semanas de experimentación

En cuanto a los horarios de medición, en la Figura 13 se observa que el punto de entrada no presentó variaciones durante el día a diferencia de los puntos intermedio y salida, los cuales registraron los valores medios (símbolos en las cajas) más elevados en el horario de 11:00 a.m. – 12:00 m. y los más bajos en el horario de 5:00 p.m. – 6:00 p.m. Este resultado podría afirmar lo mencionado por Gutiérrez (2012) la cual establece que el pH varía sus valores durante el día, alcanzando el máximo valor de este parámetro al mediodía y el más bajo a la noche.

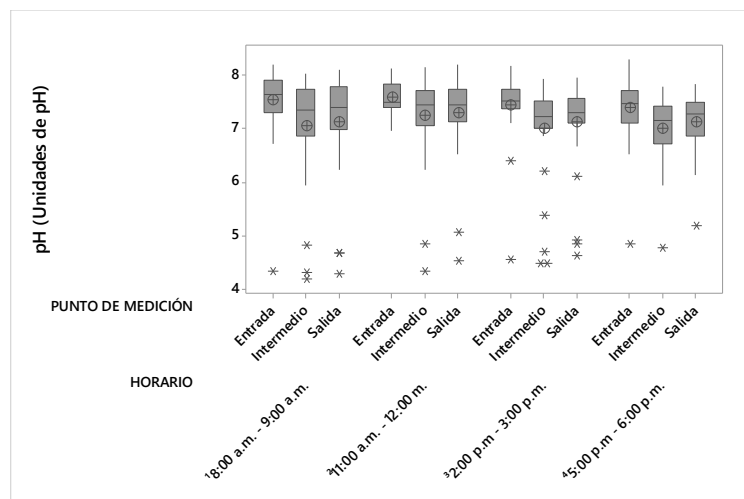
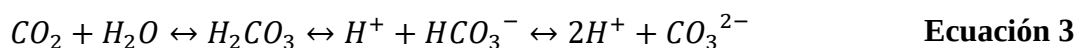


Figura 13. Comportamiento del pH según el horario y punto de medición

El pH del agua puede afectar los procesos bioquímicos que se encuentran relacionados con el crecimiento de algas presentes en sistemas algales, incluyendo la biodisponibilidad del CO_2 indispensable en el proceso de fotosíntesis, la disponibilidad y asimilación de nutrientes en forma de iones. El pH, a su vez, es controlado por el sistema carbonato que, en equilibrio con iones de hidrógeno e hidroxilo, interactúa con el CO_2 como se describe en la Ecuación 3 (Cerón et al., 2015).



Teniendo en cuenta lo mencionado en el párrafo anterior y que el afluente que ingresó a la LAAT fue sometido a un proceso de fotocátalisis, en el cual se esperó que gran parte de la materia orgánica hubiese sido transformada en CO_2 y H_2O (Mena, 2014), posiblemente dentro de la LAAT no solo se generó CO_2 por medio del proceso de mineralización de la materia orgánica por parte de comunidades bacterias presentes (Cerón et al., 2015), sino también se presentó un aporte por parte del afluente de la LAAT, lo que posiblemente permitió un aumento en la concentración de este compuesto. Al existir concentraciones elevadas de CO_2 dentro de la LAAT, es probable que haya ocurrido un proceso de generación de ácido carbónico producto de la interacción entre el CO_2 y los iones hidrógeno e hidroxilo, promoviendo la disminución del pH. Adicionalmente la profundidad, la amplitud y el tamaño de la laguna a lo mejor no permitieron que la luz solar haya penetrado toda la columna de agua, promoviendo posiblemente la acumulación de CO_2 dentro de la LAAT y evitando que este sea utilizado dentro del proceso de fotosíntesis.

5.3.1.2. Temperatura

En la Figura 14 se observa que en promedio la temperatura no presentó grandes variaciones en los tres puntos de medición. Si se evalúan los horarios de medición, entre 2:00 p.m. a 3:00 p.m. se registraron las temperaturas promedio más elevadas para los tres puntos de medición, mientras que las temperaturas más bajas se presentaron entre las 5:00 p.m. y las 6:00 p.m., si bien estos valores se encuentran alejados del resto de los datos y no concuerdan con el rango

de temperaturas que se presentaron en Santiago de Cali durante los meses de noviembre y diciembre (Min: 32 °C – Max: 17 °C) (AccuWeather, 2018), esto se deba posiblemente al proceso de conservación de las muestras.

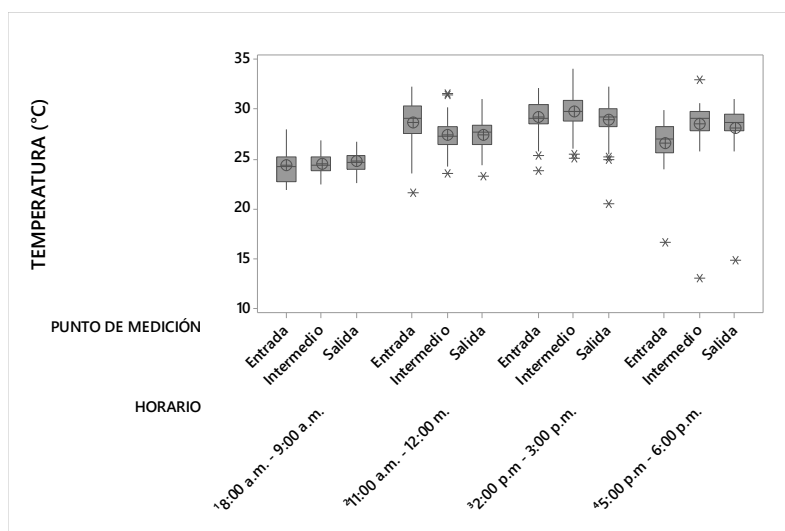


Figura 14. Comportamiento de la temperatura según el horario y punto de medición

Las reacciones químicas y biológicas de organismos acuáticos son influenciadas notoriamente por la temperatura (Cerón et al., 2015). Es una variable que se relaciona con la radiación solar y afecta tanto a la velocidad de la fotosíntesis como el metabolismo de las bacterias responsables de la disminución de la materia orgánica (Correa, 2008). Con base en lo anterior, es posible que las variaciones de temperatura registradas durante los diferentes horarios hayan estado relacionadas con la capacidad del agua de absorber y liberar calor y con los cambios de temperatura que se pudieron haber presentado en la ciudad de Cali durante el día, debido a que al medio día generalmente la temperatura máxima media oscila entre 30 y 31°C, mientras que en la madrugada la temperatura mínima puede estar entre 19 y 20°C (IDEAM, s.f), afectando posiblemente la fotosíntesis de las microalgas y el metabolismos de las bacterias presentes en la LAAT.

Sin tener en cuenta los datos atípicos obtenidos por la preservación de las muestras, es posible establecer que dentro de la unidad algal la temperatura osciló entre 22 y 33 °C. La temperatura óptima para cultivos de microalgas es generalmente entre 20 y 28°C, aunque puede variar con la composición del medio de cultivo, las especies o la macro especie cultivada. Con base en lo anterior, es posible que gran parte del tiempo la temperatura al interior de la LAAT se mantuvo dentro el rango óptimo en el cual las algas presentan una tasa fotosintética adecuada y donde se evita la respiración y la fotorrespiración algal (Cerón, 2014).

5.3.1.3. Oxígeno Disuelto

La Tabla 12 presenta los valores de oxígeno disuelto reportados durante la fase de experimentación, de esta se observa que en los tres puntos de medición el valor mínimo es de cero, lo que indica que en alguno momento los puntos de medición presentaron ausencia de oxígeno. El punto intermedio registró los valores más altos de oxígeno disuelto en

comparación con los otros puntos, esta situación pudo haberse presentado dentro de la LAAT debido a la relación simbiótica entre algas y bacterias, donde las células algales proporcionan de O_2 , carbohidratos y proteínas a las bacterias y estas a su vez, degradan el sustrato produciendo material mineralizado y CO_2 indispensable para el proceso fotosintético (Darwich, 2017). Adicionalmente, la Tabla 12 permite apreciar que el oxígeno disuelto aumenta su concentración a medida que pasa por el sistema, alcanzando un máximo de 15 mg/L en la laguna, valor que no supera los niveles diurnos de oxígeno disuelto ($> 200\%$ (20 mg/L)) reportados por Park y Craggs (2011) en tratamiento de agua residual doméstica por medio de lagunas algales de alta tasa a escala piloto (volumen total: 8 m^3 , tiempo de retención: 4 d).

La Figura 15 presenta el comportamiento del oxígeno disuelto según el horario y punto de medición. De manera general, el punto de entrada siempre registró concentraciones de OD menores a los encontrados en el punto intermedio y la salida, era de esperarse que la concentración de OD al interior de la LAAT haya sido superior que a la entrada debido a que las microalgas presentes en la unidad de tratamiento proporcionan O_2 necesario para que las bacterias realicen el proceso de degradación de la materia orgánica (Darwich, 2017). En el horario de 11:00 a.m. a 12:00 m. la entrada presentó los valores más bajos en comparación con los demás puntos, en el horario de 8:00 a.m. a 9:00 a.m. y en el de 5:00 p.m. a 6:00 p.m. tanto el punto intermedio como la salida alcanzaron los valores más bajos, incluso se registraron valores de 0 mg/L de OD. Este resultado podría corroborar lo mencionado por Gutiérrez (2012) la cual establece que el OD varía sus valores durante el día, alcanzando el máximo valor de este parámetro al mediodía y el más bajo a la noche.

De la Figura 15 también se observa que el punto de entrada siempre registró los valores promedios más bajos, esto pudo haber estado relacionado con el almacenamiento del afluente de la LAAT una vez era tratada por el fotorreactor, debido a que esta unidad sólo tardaba alrededor de 20 minutos en tratar 200 L y con dicha cantidad la LAAT era alimentada por aproximadamente 3 días, adicionalmente dentro del tanque de almacenamiento no existía un mecanismo de adición de O_2 . El punto intermedio presentó una concentración de OD igual a 0 mg/L en el horario de 5:00 p.m. a 6:00 p.m., dicha concentración podría relacionarse con la poca radiación solar que pudo haberse presentado en ese horario por lo que el proceso de fotosíntesis posiblemente se inhibió (Ocampo, 2014).

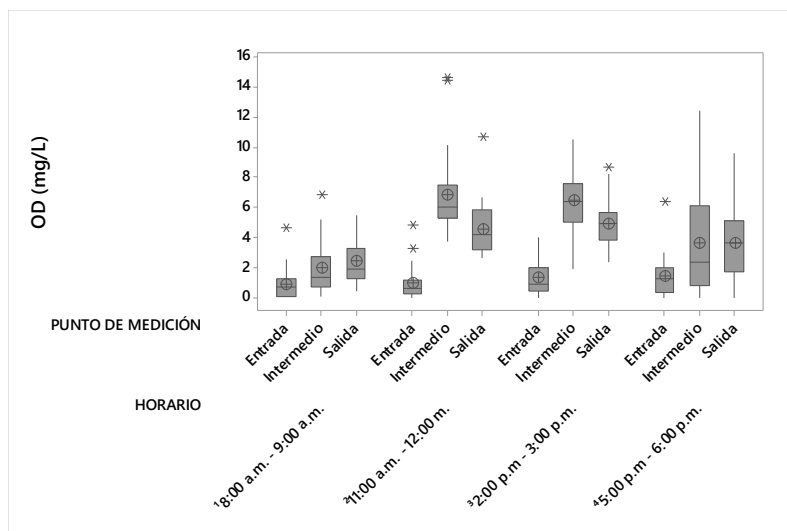


Figura 15. Comportamiento del oxígeno disuelto según el horario y punto de medición

5.3.1.4. Conductividad Eléctrica

La Tabla 12 evidencia de manera general que la conductividad eléctrica promedio más alta la presentó el punto de entrada, el valor mínimo y máximo que registró este parámetro durante el periodo de experimentación también se presentó en la entrada, así como la mayor variabilidad entre los datos. En la Figura 16 se puede apreciar que el punto de entrada presentó posibles valores extremos, el máximo fue alcanzado entre las 11:00 a.m. y las 12:00 m. y el mínimo entre las 2:00 p.m. y las 3:00 p.m. En términos generales, el comportamiento de los puntos intermedio y salida son muy similares en todos los horarios de medición.

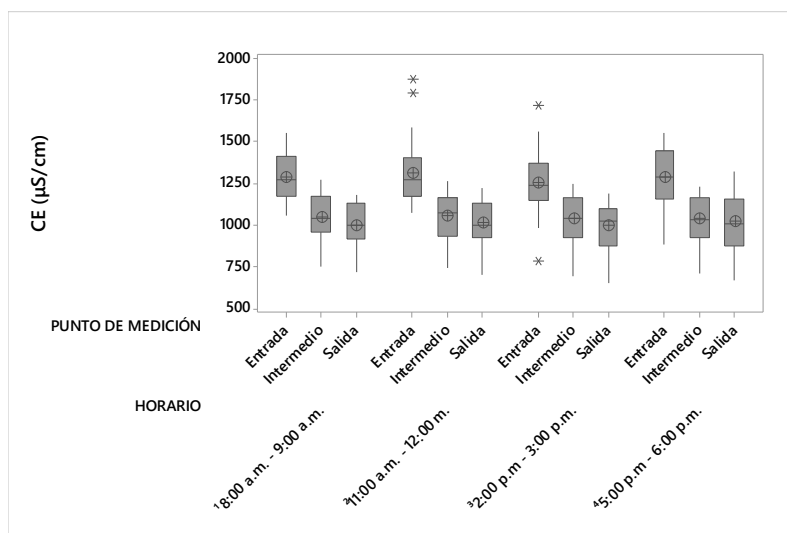


Figura 16. Comportamiento de la conductividad eléctrica según el horario y punto de medición

Las microalgas presentan adaptaciones y ciertos mecanismos de tolerancia a sales de metales, debido a los procesos de absorción, adsorción y desorción que se pueden llevar a cabo en las membranas. Los metales más estudiados en los procesos de biorremediación de metales pesados

con microalgas son: Cd, Zn, Cu, Ag, Pb, Hg, Ni y Cr. Así mismo, los géneros de *Chlorella* y *Scenedesmus*, han presentado las mayores capacidades de disminución de los metales anteriormente mencionados (Salazar, 2005). Con base en lo anterior y teniendo en cuenta que la conductividad eléctrica es una medida indirecta de la presencia de sales en el medio, se podría afirmar que la disminución que se presentó dentro de la LAAT podría estar relacionada con la asimilación de sales por parte de las microalgas, en especial de sales de metales que posiblemente se encontraron en el agua residual debido a las descargas de los laboratorios, supuesto que se plantea con base en los resultados obtenidos por las encuestas realizadas a los laboratorios de la Universidad del Valle que efectuaban descargas al alcantarillado. Adicionalmente, las especies identificadas durante este estudio hacen parte de los géneros que mayor capacidad de disminución de metales han presentado según lo establecido por Salazar (2005).

Si se pensara en reusar el efluente que sale de la LAAT para actividades como riego de zonas verdes en la universidad, sería necesario conocer los rangos establecidos para este parámetro debido a que valores elevados de conductividad eléctrica pueden generar efectos a largo plazo sobre las condiciones del suelo. La FAO estableció las directrices para interpretar la calidad de las aguas de riego, estas directrices relacionan el grado de restricción de uso del agua de acuerdo con los parámetros de salinidad, infiltración y toxicidad de los iones específicos. Para el caso particular de la conductividad eléctrica, la FAO presenta tres grados de restricción de uso, de acuerdo con estos grados el efluente de la LAAT se clasificaría como sin riegos (< 0.7 dS/cm) por lo que sería posible utilizar el efluente sin problema (Jaramillo, 2010).

5.3.1.5. Potencial de Óxido-Reducción

La Tabla 12 muestra de manera general que el potencial de óxido-reducción en el sistema se mantuvo en condiciones oxidantes, esta situación junto con la presencia de oxígeno disuelto en la LAAT la mayor parte del tiempo posiblemente permitió que la materia orgánica y otros compuestos se oxidaran.

Los potenciales de óxido-reducción que pueden presentarse en la naturaleza van desde un mínimo de $-4,200$ mV hasta un máximo de $+8,200$ mV. El límite inferior concuerda con un ambiente muy reductor rico en gas hidrógeno ideal para el crecimiento de microorganismos anaerobios estrictos (ejemplo: bacterias metanogénicas) mientras que el límite superior se alcanza en ambientes muy oxigenados-oxidante (Correa, 2008). Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, los valores negativos alcanzados durante la fase experimental en los tres puntos de medición se podrían relacionar con un ambiente anóxico, debido a las condiciones de almacenamiento del afluente de la LAAT (tanque cerrado expuesto al sol) y las situaciones en las que el OD dentro de la LAAT fue de 0 mg/L o muy cercano a este valor. Los valores positivos que se alcanzaron gran parte del tiempo al interior de la LAAT, posiblemente se presentaron debido a que las microalgas proporcionan O_2 necesario para que las bacterias realicen el proceso de degradación de la materia orgánica (Darwich, 2017).

La Figura 17 permite caracterizar el potencial de óxido-reducción respecto al horario y punto de medición. De manera general, se observa que el punto de entrada siempre registró el valor promedio menor entre los horarios de medición, mientras que los puntos intermedio y salida presentaron valores medios muy similares en los diferentes horarios de medición y mayores a

los de la entrada. Con base en lo establecido por Correa (2008) y lo presentado en la Figura 17, es posible establecer que durante la fase de experimentación el sistema algal presentó ambientes anóxicos (entrada) y aerobios (intermedio y salida). Adicionalmente, los horarios de máxima actividad oxidativa (11:00 a.m. - 12:00 m. y 2:00 p.m. - 3:00 p.m.) posiblemente estuvieron asociadas directamente con los valores máximos de temperatura y oxígeno disuelto como se evidencia en la Figura 14 y en la Figura 15.

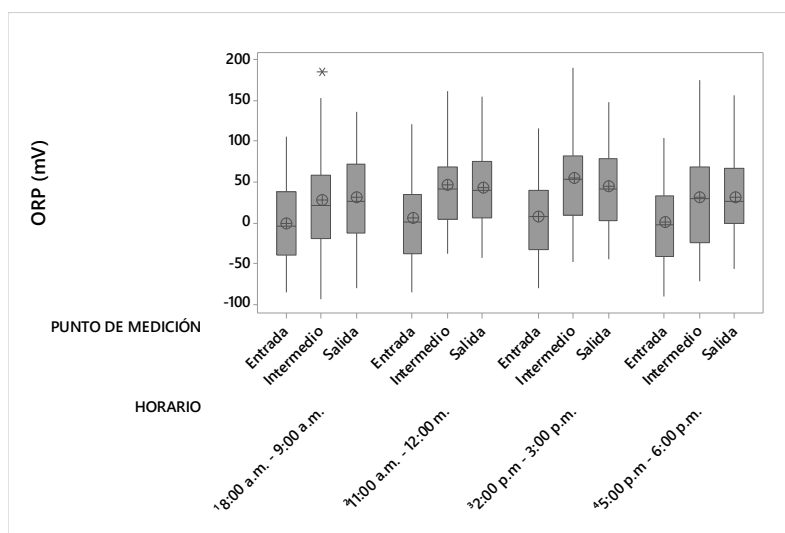


Figura 17. Comportamiento del potencial de óxido-reducción según el horario y punto de medición

Los resultados obtenidos del potencial de oxido-reducción dentro de la LAAT, difieren de los reportados por Cerón (2014) dentro del sistema algal (Media: 61.89 mV, Min: -194.2 mV, Max: 337 mV), esta diferencia posiblemente se encuentra relacionada con el tipo de agua residual tratada por cada LAAT, debido a que existe una amplia diferencia entre lixiviados y agua residual de campus universitario. A pesar de las diferencias existentes los tipos de agua residual, ambos estudios reportaron valores positivos de potencial de oxido-reducción lo que evidenciaría la oxidación de la materia orgánica a CO_2 en un medio aerobio (Zurita et al., 2011).

La composición de los lixiviados (materia orgánica, nutrientes, metales pesados, compuestos recalcitrantes y xenobióticos) ha llevado a que las tecnologías empleadas para su tratamiento se enfoquen en métodos químicos y físicos, dejando a un lado los métodos biológicos (Cerón, 2014).

5.3.1.6. Alcalinidad

La Figura 18 muestra la relación entre la variable alcalinidad, el horario y el punto de medición, de esta se evidencia que el punto de entrada siempre registró los valores más elevados en comparación con el punto de salida sin importar el horario en el que se haya realizado la medición. Como la alcalinidad es una medida de la capacidad de neutralizar ácidos (sales de ácidos débiles o bases fuertes), este parámetro se encuentra relacionado con el pH, por lo que se podría pensar que las disminuciones que se evidenciaron entre la entrada y la

salida durante los horarios de medición posiblemente estuvieron relacionadas con los cambios cíclicos durante el día que afectan el sistema carbonato debido principalmente a la actividad fotosintética de las algas (Correa, 2008). Como se mencionó en la sección 5.3.1.1, al existir concentraciones elevadas de CO_2 dentro de la LAAT, es posible que haya sucedido un proceso de generación de ácido carbónico promoviendo la disminución del pH y a su vez de la alcalinidad.

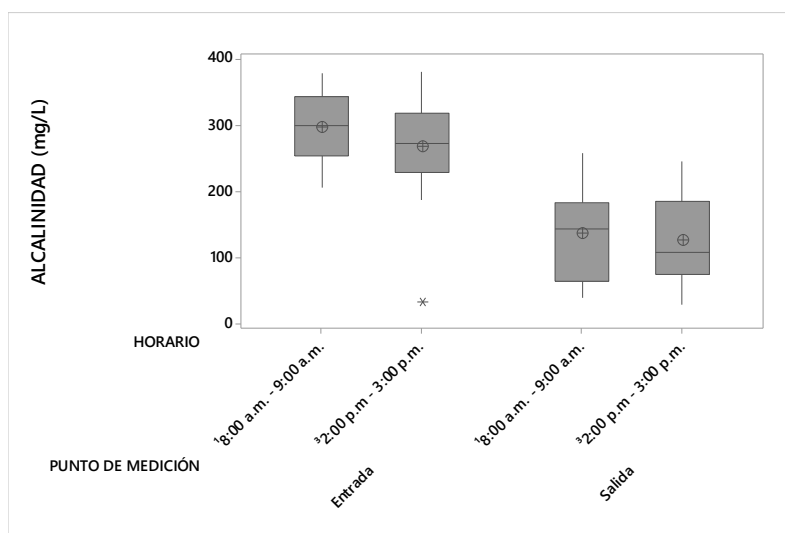


Figura 18. Relación entre alcalinidad, horario y punto de medición

La alcalinidad durante la fase de experimentación presentó un porcentaje de reducción promedio del 54%, valor que supera el rango reportado por Craggs et al. (2012) en el tratamiento del agua residual por medio de 4 LAAT, las cuales alcanzaron porcentajes de disminución entre el 26 y el 35% de manera individual. Por su parte, Cerón (2014) registró un porcentaje de disminución de alcalinidad del 13.6% en el tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario por medio de una LAAT, valor que se encuentra muy por debajo de lo encontrado en este estudio, es importante tener presente que las aguas residuales tratadas durante las investigaciones difieren significativamente en su composición. Como la alcalinidad se ve afectada por las variaciones de pH y durante dos las primeras semanas de estudio se evidenciaron cambios notables y constantes de pH, la Figura 19 evidencia el comportamiento de la alcalinidad durante el estudio, donde los mayores cambios en los puntos de medición se registraron durante las tres primeras semanas, incluso la tercera semana presentó la mayor variabilidad de los datos, dichas variaciones se podrían relacionar con los cambios de pH reportados.

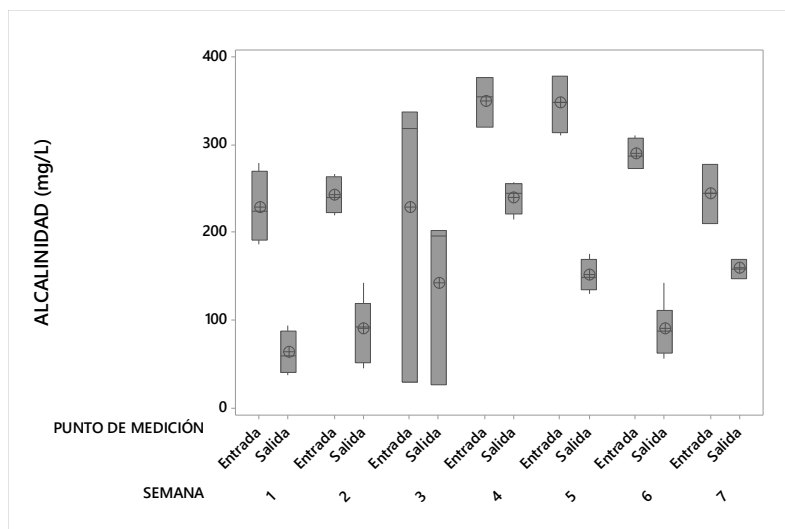


Figura 19. Comportamiento de la alcalinidad en los puntos de medición durante las semanas de experimentación

5.3.2. Comportamiento de la Materia Orgánica

La disminución de la materia orgánica realizada por la LAAT se evaluó en términos de las siguientes variables: $DQO_{filtrada}$, DBO_5 , COD y SST. Con el propósito de evitar la interferencia en la medición de la DQO por parte de la biomasa algal, se realizaron las mediciones de este parámetro con muestra filtrada. La concentración media a la entrada y salida de la LAAT, los valores máximos y mínimos alcanzado en cada uno de los puntos de medición y el porcentaje de disminución para las variables $DQO_{filtrada}$, DBO_5 , COD y SST se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados y porcentajes de disminución de $DQO_{filtrada}$, DBO_5 , COD y SST

Parámetro	Unidad	Entrada		Salida		% de disminución
		Media $\pm$ s.d.	Min/Max	Media $\pm$ s.d.	Min/Max	
$DQO_{filtrada}$	mg O_2 /L	209.8 $\pm$ 118.8	25.0 / 417.2	173.1 $\pm$ 120.2	25.2 / 362.1	64
DBO_5	mg O_2 /L	26.7 $\pm$ 12.1	10.0 / 40.0	21.3 $\pm$ 10.3	8.0 / 40.0	58
COD	mg/L	224.5 $\pm$ 105.0	102.7 / 371.7	143.6 $\pm$ 77.6	37.6 / 232.6	48
SST	mg/L	20.7 $\pm$ 16.1	2.0 / 38.0	73.7 $\pm$ 30.1	36.0 / 128.0	-

5.3.2.1. Demanda Química de Oxígeno Filtrada

La $DQO_{filtrada}$ permite cuantificar la materia orgánica e inorgánica disuelta disponible para ser degradada y/o transformada por los microorganismos. La Figura 20 muestra el comportamiento de la $DQO_{filtrada}$ a la entrada y salida de la LAAT. De esta se observa como al principio de la fase experimental, la $DQO_{filtrada}$ fue mayor a la salida que a la entrada, lo que podría estar relacionado con el crecimiento de la biomasa y la acumulación de la materia orgánica dentro de la LAAT que posiblemente interfirieron en la medición de este parámetro. Sin embargo, después de la semana tres y hasta la seis, la concentración de $DQO_{filtrada}$ a la salida fue menor que a la entrada, evidenciando un fenómeno de degradación y/o transformación de la materia orgánica disuelta. A pesar de realizar un proceso de filtración a las muestras, en donde gran parte de la biomasa (microalgas en su mayoría) fue retenida con el

propósito de establecer con certeza cuanta materia orgánica disuelta en forma de DQO fue degradada dentro de la LAAT, cerca de la mitad de los resultados obtenidos registraron mayor concentración a la salida que a la entrada lo que pudo estar relacionada con la acumulación de materia orgánica dentro de la laguna en las horas de la noche y al momento de tomar la muestra (primeras horas del días) para hacer la medición de este parámetro se haya generado un lavado en el sistema (la acumulación de materia orgánica salió del sistema).

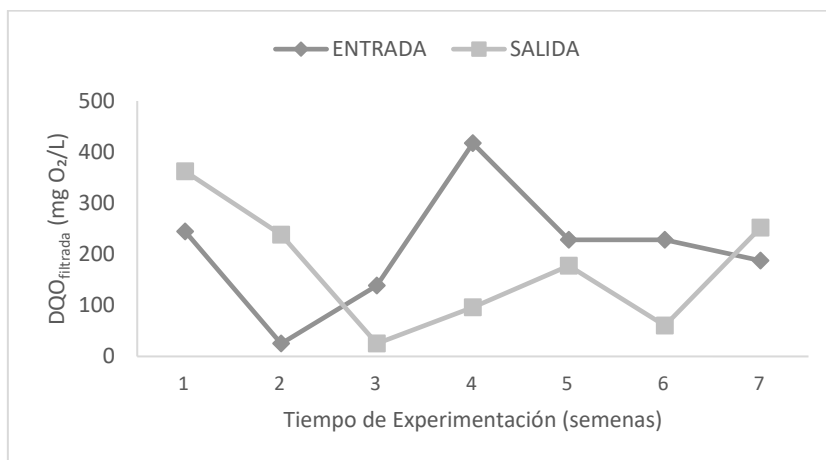


Figura 20. Comportamiento de la DQO en la LAAT

En el estudio realizado por Marín y Correa (2010), utilizaron la tecnología de humedales artificiales como tratamiento terciario para el efluente a PTAR de la Universidad Tecnológica de Pereira, durante le investigación se estableció que un humedal alcanzó un porcentaje de degradación de la DQO del 64.35% valor que se encuentra muy cerca del alcanzado por la LAAT (64%) en el marco de esta investigación. La comparación entre los dos estudios es válida debido a que el agua tratada proviene de las actividades realizadas dentro de campus universitarios y los sistemas empleadas pueden catalogarse como tecnologías ecológicas sostenibles. Adicionalmente, en el estudio realizado por Gutiérrez (2012) se reportaron rendimientos de disminución de materia orgánica entre el 60 y 80% en el tratamiento de agua residual combinada (agua residual sintética y agua residual urbana) por medio de dos lagunas algales de alta tasa, dentro de este rango se encuentra el valor alcanzado por la LAAT en el marco de este proyecto. Por otra parte, Winanti et al. (2018) evaluaron el tratamiento del agua residual del campus universitario UNESA en indonesia mediante un humedal construido y reportaron tasas de disminución de DQO las cuales oscilaron entre el 85 y el 87%, rango que evidentemente supera al porcentaje alcanzado en el marco de este proyecto.

En el proceso de degradación de la DQO, la asociación entre microalgas y bacterias presentes en la LAAT desempeña un papel importante debido a que la actividad fotosintética realizada por las algas aporta oxígeno disuelto al sistema permitiendo que las bacterias realicen el proceso de transformación de la materia orgánica (Winanti et al., 2018). Con base en lo anterior, se podría relacionar el porcentaje de disminución de DQO_{filtrada} alcanzado por la LAAT con una buena asociación entre algas y bacterias y un proceso adecuado de fotosíntesis.

5.3.2.2. Demanda Biológica de Oxígeno

Finalizada la etapa experimental se determinó el porcentaje de disminución de DBO_5 alcanzado por la LAAT el cual fue del 58%, dicho valor es similar a lo reportado por Craggs et al. (2012) en el tratamiento del agua residual proveniente de la sedimentación primaria realizada en la PTAR de Christchurch en Nueva Zelanda por medio de 4 LAAT (área total 4 LAAT: 5 ha, volumen por LAAT: 1.5 ha), las cuales alcanzaron porcentajes de disminución entre el 51.5 y el 46.8% de manera individual. Por otra parte, Winanti et al. (2018) reportan porcentajes de disminución de la DBO_5 entre el 85 y el 88% en el tratamiento del agua residual del campus universitario Unesa Ketintang Surabaya en Indonesia por medio de un humedal construido de flujo horizontal subsuperficial (área superficial: 0.5 m^2 , volumen: 0.25 m^3 , tiempo de retención: 1 d); a pesar que Winanti et al. (2018) reportan eficiencias superiores a las alcanzadas en la LAAT la comparación es pertinente debido a que existe poca información relacionada con el tratamiento de agua residual de campus universitarios con una ecotecnología. En el tratamiento de agua residual doméstica por medio de 2 lagunas algales de alta tasa idénticas a escala piloto (área superficial: 31.8 m^2 , volumen: 8 m^3 , tiempo de retención: 4-8 d), Park y Craggs (2010) reportaron eficiencias de disminución total de DBO_5 entre el 77.6 y 79.1%, valores superiores a los encontrados en el marco de esta investigación, lo que permite inferir que el tamaño de las unidades de tratamiento, el tiempo de retención, las características del agua residual y la ubicación de las lagunas algas (respecto a la luz solar) puede influir en el desempeño de la unidad. De manera general, la unidad de tratamiento obtuvo un desempeño del 58% en términos de DBO_5 , pero si el tiempo de estudio hubiera sido más prolongado, posiblemente se hubiera obtenido un mayor desempeño debido a la tendencia creciente que presentó este parámetro durante la fase de experimentación.

5.3.2.3. Carbono Orgánico Disuelto

El comportamiento del COD a la entrada y salida de la LAAT se evidencia en la Figura 21. Se observa que la concentración de COD a la entrada fue mayor que a la salida. El COD al ser una medida de la materia orgánica natural en descomposición y de compuestos químicos sintéticos presentes en el agua residual (Mena, 2014), permite afirmar que dentro de la LAAT se presentó un proceso de degradación de la materia orgánica disuelta, mostrando un porcentaje de disminución del 48%. Sin embargo, el porcentaje de disminución más bajo encontrado fue del 33% el cual puede relacionarse con las características del agua residual debido posiblemente al cambio de las condiciones en el punto de muestreo por la poca presencia de personal en la universidad en dicha época del año (diciembre) donde finaliza el periodo académico.

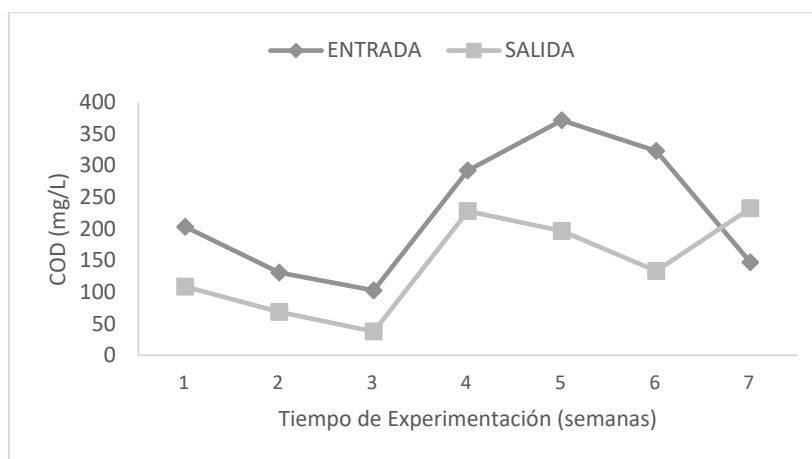


Figura 21. Comportamiento del COD en la LAAT

El porcentaje de disminución del COD reportado por Cerón (2014) en el tratamiento de lixiviados provenientes de un relleno sanitario no logró sobrepasar un 10%, este se encontró por debajo del alcanzado por la LAAT evaluada en el marco de este proyecto; las diferencias en eficiencia de disminución del COD podría estar relacionada con la diferencia de la matriz de agua residual tratada, debido a que los lixiviados se pueden catalogar como un residuo de alta complejidad debido a la diversidad de contaminantes y metales pesados, a diferencia del agua residual proveniente del campus universitario.

5.3.2.4. Sólidos Suspendedos Totales

La Tabla 13 evidencia los resultados de SST obtenidos durante la fase de experimentación, de esta se observa que el punto de salida siempre registró mayor concentración que la entrada, alcanzando los siguientes valores de media (73.7 mg/L), mínimo (36.0 mg/L) y máximo (128.0 mg/L).

Al registrarse mayor concentración de SST a la salida, la LAAT presetó un porcentaje de disminución negativo. Este resultado se explica debido a la generación de biomasa (especialmente algas) que se presenta en la laguna y que sale debido al flujo del agua, por lo que se evidenció al momento de realizar los análisis de SST. Esta situación amerita pensar en un sistema de recolección de biomasa posterior al tratamiento permitiendo darle un valor agrado al agua residual tratada. Situación similar a la evidenciada en el marco de este proyecto, se presentaron en las investigaciones de: Park y Craggs (2010), Park y Craggs (2011), Craggs et al. (2012) lo que evidencia la concentración de biomasa en suspensión generada en el tratamiento del agua residual por medio de LAAT.

5.3.3. Comportamiento de Nutrientes

La disminución de nutrientes realizada por la LAAT se evaluó en términos de las siguientes variables: NH_4^+ , NO_3^- , NTK y PO_4^{3-} . La concentración media en los puntos de medición de la LAAT, los valores máximos, mínimos y el porcentaje de disminución para las variables se presentan en la Tabla 14.

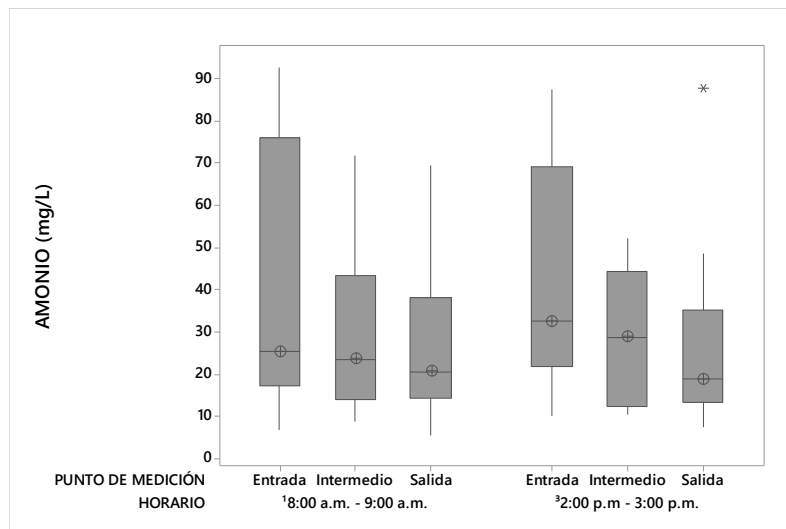
Tabla 14. Resultados y porcentajes de disminución de NH_4^+ , NO_3^- y NTK

Parámetro (mg/L)	Entrada		Laguna		Salida		% de disminución
	Media $\pm$ s.d.	Min/Max	Media $\pm$ s.d.	Min/Max	Media $\pm$ s.d.	Min/Max	
NH_4^+	41.7 $\pm$ 27.1	6.8 / 92.5	30.6 $\pm$ 17.4	8.7 / 71.9	27.2 $\pm$ 19.1	5.7 / 87.5	37
NO_3^-	7.6 $\pm$ 6.2	2.7 / 36.7	30.5 $\pm$ 14.9	10.2 / 58.2	31.3 $\pm$ 13.9	12.1 / 59.1	-
NTK	97.3 $\pm$ 18.2	75.4 / 128.0			54.3 $\pm$ 17.3	31.6 / 76.5	44
PO_4^{3-}	41.7 $\pm$ 27.1	6.8 / 92.5	30.6 $\pm$ 17.4	8.7 / 71.9	27.2 $\pm$ 19.1	5.7 / 87.5	15

5.3.3.1. Amonio

Las distintas formas del nitrógeno son nutrientes esenciales para el crecimiento de las algas en sistemas de LAAT (Hernández y Labbé, 2014). En general, el contenido en nitrógeno de la biomasa algal puede oscilar entre un 1% y hasta más del 10%, dependiendo de la disponibilidad y el tipo de fuente de nitrógeno. En general, las microalgas pueden tomar nitrógeno del medio en forma de urea, amonio, nitrato, nitrito, nitrógeno gas y óxidos de nitrógeno (NO_x) en algunos casos (Martínez, 2011). Dentro de este estudio el amonio presentó un comportamiento general de disminución en el paso por el sistema algal.

La Figura 22 evidencia la interacción horaria con el punto de medición para el amonio, de esta se observa que el punto de entrada siempre presentó la mayor concentración promedio. Adicionalmente se encontró que el punto intermedio no difiere mucho con el punto de salida en lo relacionado con la concentración promedio. Según se observó durante la fase experimental, la ubicación de la laguna dentro del acople permitió que la mayor radiación solar se presentara entre las 10:00 a.m. y las 3:00 p.m., si se establece que el crecimiento de los microorganismos fotosintéticos dependerá principalmente de la intensidad de la luz y de los nutrientes disponibles, se podría establecer la razón por la cual en el horario de 2:00 p.m. – 3:00 p.m. se presentó una mayor disminución del amonio en comparación con la medición de 8:00 a.m. – 9:00 a.m. teniendo en cuenta los valores promedios.

**Figura 22.** Comportamiento del amonio según punto de medición y horario

En la Figura 23 se presenta el comportamiento del amonio durante las semanas de experimentación en cada uno de los puntos de medición. De manera general, se observa que las concentraciones promedio en los tres puntos de medición decrecieron con el paso de las semanas, esta situación posiblemente estuvo relacionado con la disminución de la población algal que podría haber afectado la asimilación del amonio como nutriente o a las variaciones en términos de composición que posiblemente presentó el agua residual, debido a que las características del agua residual probablemente dependan de la afluencia de estudiantes y descargas de laboratorios y cafeterías.

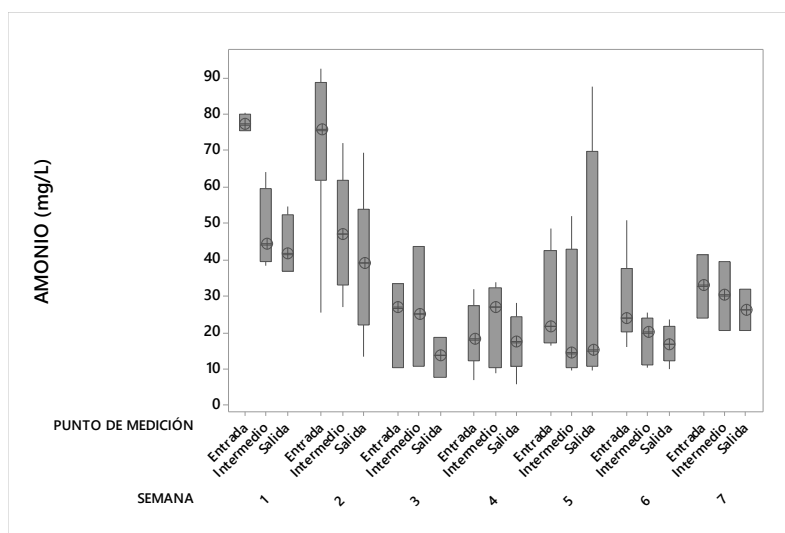


Figura 23. Comportamiento del amonio en los puntos de medición durante las semanas de experimentación

Teniendo en cuenta solo los valores en los que la concentración a la entrada de la LAAT fue mayor que a la salida, se podría establecer un promedio del porcentaje de disminución del amonio alcanzado por el sistema del 37%, dicho valor se encuentra alejado de lo reportado por Craggs et al. (2012) en el tratamiento del agua residual por medio de 4 LAAT, las cuales alcanzaron porcentajes cercanos al 65% de manera individual. Por su parte, Park y Craggs (2011) reportaron eficiencias de disminución del nitrógeno amoniacal entre el 91.8 y 96.9% con y sin la adición de CO_2 en las lagunas algales de alta tasa, valores muy superiores a los encontrados en el marco de esta investigación. Es posible que el porcentaje de disminución alcanzado por la laguna no haya sido más elevado, debido a que la unidad de tratamiento que la antecede posiblemente disminuyó la concentración amonio permitiendo que menor cantidad de este compuesto entrara a la LAAT; a diferencias de los trabajos citados anteriormente donde el tratamiento del agua residual solo se realizó por sistemas algales.

Adicionalmente, es posible que dentro de la LAAT haya ocurrido el proceso de nitrificación debido al aumento en la concentración de este compuesto que se evidencia a la salida del sistema. Lo que podría estar relacionado con una ruta de preferencia dentro del mecanismos de transformación biológica de nitrógeno en donde gran parte del amonio pudo ser transformado a nitrato en lugar de ser asimilado (Figura 24).

5.3.3.2. Nitrato

El proceso de nitrificación consiste en la conversión del nitrógeno amoniacal a nitrito por parte de las bacterias amonioxidantes (AOB) y la transformación del nitrito a nitrato a cargo de las bacterias nitritoxidantes (NOB), este proceso se realiza en presencia de O_2 . Por su parte, el proceso de desnitrificación consiste en la reducción del nitrito a compuestos de nitrógeno gaseoso (NO , N_2O y N_2) en presencia de una fuente de carbono orgánica, este proceso suele darse en ambientes anóxicos, carentes de oxígeno y con disponibilidad de nitrito y nitrato como aceptores de electrones (Claros, 2012). La Figura 24 evidencia lo mencionado anteriormente.

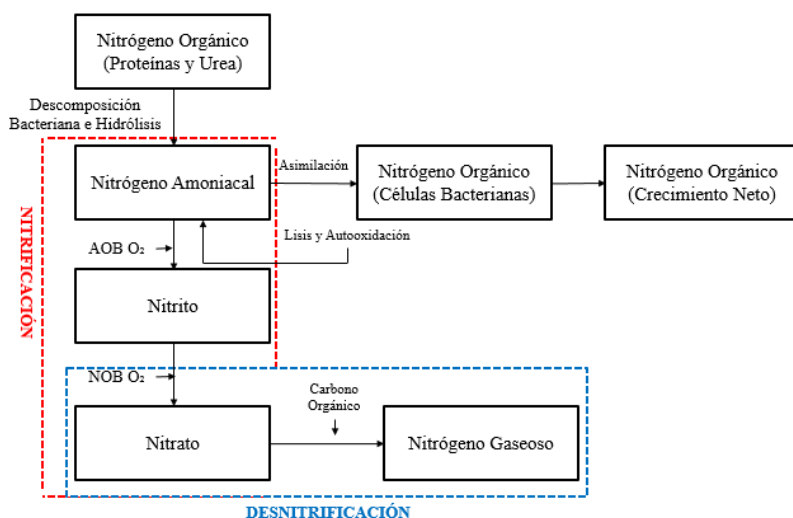


Figura 24. Transformaciones del nitrógeno, procesos de nitrificación y desnitrificación
Fuente: Claros, 2012

La Figura 25 presenta el comportamiento del nitrato según el punto de medición, de esta se observa que la concentración de entrada a la LAAT registró las concentraciones de nitrato más bajas en comparación con los puntos intermedio y salida, a pesar que estos en promedio no presentan diferencias significativas, el aumento en la concentración de nitrato se podría relacionar con el proceso de nitrificación que posiblemente se presentó dentro de la LAAT debido a que la mayor parte del tiempo el sistema algal presentó un ambiente aerobio (OD y ORP positivos) ideal para la transformación del nitrógeno amoniacal a nitrato. Es probable que el proceso de desnitrificación también se haya presentado dentro de la LAAT, pero sólo en los momentos en que se presentaron condiciones anóxicas (ausencia de O_2 y ORP negativo de poco valor), posiblemente en la noche.

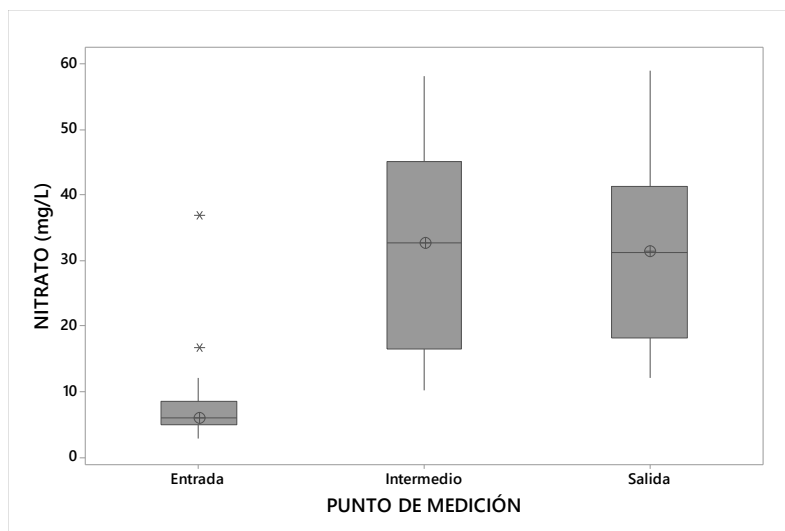


Figura 25. Comportamiento del nitrato según el punto de medición

Otro de los mecanismos de transformación biológica del nitrógeno que se puede presentar en el tratamiento de agua residual es el proceso anammox, el cual consiste en la conversión del amonio a nitrógeno gaseoso, empleando el nitrito como aceptos de electrones bajo condiciones anaerobias (Claros, 2012). Con base en lo anterior se podría establecer que en la LAAT posiblemente no se pudo haber presentado este proceso debido a que el sistema algal no presentó condiciones anaerobias (ambiente muy reductor, ORP negativo) durante la fase de experimentación.

Al igual que lo encontrado en el marco de esta investigación, en el estudio realizado por Park y Craggs (2011) también reportaron aumentos en la concentración de nitrato a la salida de las lagunas algales de alta tasa, sin la adición de CO₂ para el tratamiento del agua residual por medio de sistemas algales.

5.3.3.3. Nitrógeno Total Kjeldahl

La Tabla 14 presenta los resultados de NTK obtenidos durante el periodo experimental, de esta se observa que el punto de entrada presentó un valor medio (97.3 mg/L), mínimo (75.4 mg/L) y máximo (128.0 mg/L) superior al punto de salida, por lo que se podría pensar que dentro del sistema se presenta un proceso de disminución y/o transformación del NTK.

La Figura 26 evidencia el comportamiento del NTK a la entrada y salida de la LAAT. De esta se observa que, durante la fase experimental el NTK a la salida fue siempre menor que a la entrada, reflejando un proceso de reducción del nitrógeno total.

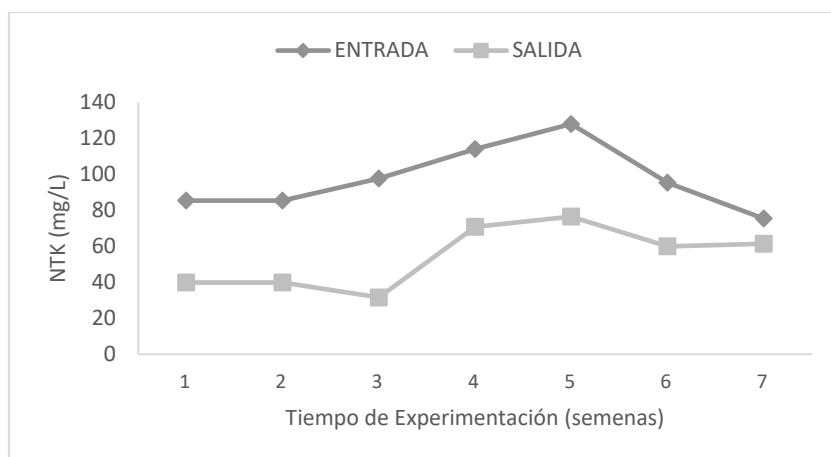


Figura 26. Comportamiento del NTK en la LAAT

Al registrar menor concentración de NTK a la salida, la LAAT presentó un porcentaje de disminución del 44%, valor que se encuentra relativamente cerca al reportado por Arbib et al. (2013) en el tratamiento terciario de agua residual urbana por medio de una LAAT de 530 L, la cual alcanzó un porcentaje del 65.12%. Por su parte, Winanti et al. (2018) reportan porcentajes de disminución de nitrógeno total entre el 91 y el 97% en el tratamiento del agua residual del campus universitario Unesa Ketintang Surabaya en Indonesia por medio de un humedal construido. Adicionalmente, Gutiérrez (2012) reportó porcentajes de disminución de nitrógeno entre el 90 y el 98% en el tratamiento de agua residual combinada (agua residual sintética y agua residual urbana) por medio de dos lagunas algales de alta tasa, estos dos estudios presentan valores que se encuentra muy por encima de los encontrados en el marco de esta investigación, por lo que se podría pensar que los porcentajes de disminución difieren significativamente por la composición del agua residual o si el sistema algal es empleado como tratamiento único o unidad de pulimento posterior a unidades a tratamiento.

5.3.3.4. Fosfatos

El fósforo es fundamental en muchos procesos celulares, tales como la formación de ácidos nucleicos y transferencia de energía. Aunque el contenido de fósforo en las microalgas es menor al 1%, su deficiencia en el medio de cultivo es una de las mayores limitaciones al crecimiento (Hernández y Labbé, 2014). Existen factores que ralentizan la asimilación de fosfatos por parte de las algas, como un pH excesivamente alto o bajo, o la ausencia de iones como potasio, sodio o magnesio (Martínez, 2011).

Con base en la relación existente entre el día de la semana y el punto de medición, se muestra que el lunes registró la mayor concentración promedio de fosfatos tanto para el punto de entrada como el de salida, pero a su vez, ese día presentó la mayor dispersión entre los valores. En cuanto a los miércoles y viernes, no se registraron notables diferencias entre los niveles de fosfatos promedio en los puntos de medición, siendo el viernes el día que mostró la menor variabilidad según la simetría de las cajas. Lo mencionado anteriormente se evidencia en la Figura 27.

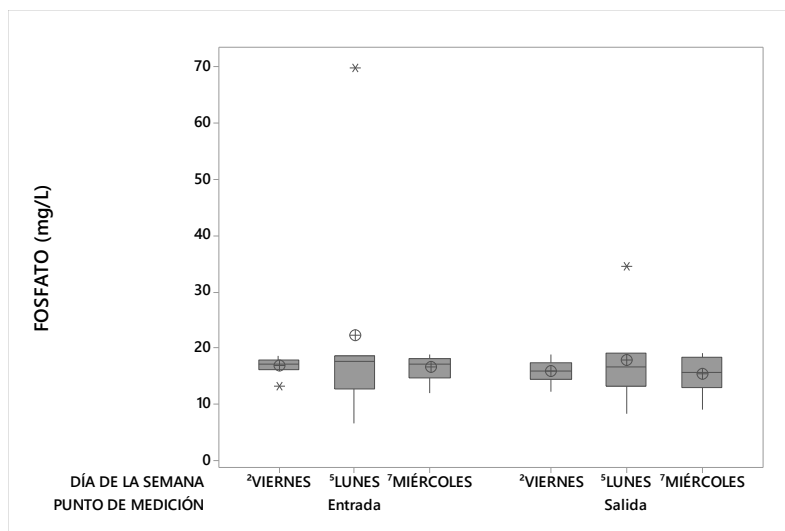


Figura 27. Comportamiento del fosfato según día de la semana y punto de medición

El fosfato al ser una medida indirecta del fósforo permite conocer la presencia de este compuesto dentro de un sistema. Durante la fase de experimentación se registraron mediciones de fosfato a la entrada y salida del sistema, con base en lo anterior la LAAT presentó un porcentaje de disminución del fósforo del 15%. Si este valor se compara con la disminución total (21.87%) reportada por Romero et al. (2009) en el tratamiento del agua residual a escala piloto, se podría establecer que los valores se encuentran relativamente cerca. La comparación entre los dos estudios es válida debido a que Romero et al. (2009) trataron agua residual de un edificio donde se realiza investigación científica (mezcla de agua proveniente de baños y laboratorios) con características similares al agua residual del campus universitario, por medio de 3 humedales artificiales de flujo horizontal con dos especies vegetales (*Phragmites australis* y *Typha domingensis*), los cuales se pueden catalogar como una tecnología ecológica sostenible al igual que los sistemas algales de alta tasa. Es importante aclarar que en humedales se presentan mayores porcentajes de disminución del fósforo debido al proceso de adsorción que se favorece principalmente por la presencia del medio de soporte, la disminución se realiza hasta que el medio de soporte se satura y es ahí donde comienza a disminuir la eficiencia de este tipo de sistema (Luna y Ramírez, 2004).

Es posible que la disminución del fósforo que se presentó en la LAAT haya estado relacionada con la precipitación de este compuesto o la incorporación al interior de la biomasa algal. La disminución biológica del fósforo se ve afectado por factor como el pH, tipo y disponibilidad de materia orgánica, aireación excesiva, tiempo de retención celular, temperatura, presencia de nitratos y nitritos, entre otros (Venegas, 2015). Con base en lo anterior, se podría explicar porque la concentración de este compuesto disminuye a su paso por la LAAT. Adicionalmente, se podría pensar que las variaciones de pH que se presentaron en la LAAT durante la fase de experimentación pudieron haber afectado el proceso de asimilación del fosfato por parte de las microalgas.

5.3.4. Análisis Estadístico de las Variables DQO_{filtrada}, DBO₅ y NTK

En la Tabla 15 se muestran los resultados para cada uno de los parámetros DQO_{filtrada}, DBO₅ y NTK, donde se evidencia que la semana no presenta un efecto relevante, indicando que entre semanas no hay diferencias significativas en cuanto a las mediciones realizadas de los parámetros. En relación con el punto de medición, solo se evidencia un efecto significativo para el parámetro NTK, lo cual sugiere que las mediciones realizadas de DQO y DBO₅ en la entrada y la salida no difieren estadísticamente, mientras que las mediciones realizadas de NTK a la entrada y a la salida si presentan diferencias encontrándose mayor concentración a la entrada (97.33 ± 18.20) en comparación con la salida (54.27 ± 17.25).

Tabla 15. Análisis de varianza para evaluar el efecto del punto de medición y la semana

Parámetro	Factor			
	Punto de Medición		Semana	
	Estadístico	Valor-p	Estadístico	Valor-p
DQO	0.2823	0.5952	0.5240	0.9975
DBO ₅	0.5289	0.4671	0.3515	0.9966
NTK	51.3409	7.76e-13*	2.9417	0.8161

* Efecto significativo a un nivel de 5%

De lo mencionado anteriormente, es posible corroborar las variaciones en cuanto a la concentración de entrada y salida que se presentaron durante la fase de experimentación con respecto a la DQO_{filtrada} y la DBO₅, es decir el sistema no presentó un comportamiento constante durante la experimentación en términos de disminución de dichos parámetros. Se esperaría que las condiciones del agua residual no fueran constantes debido a la procedencia de esta (antropogénica). En cuanto al NTK, el comportamiento presentado durante la fase de experimentación se podría ser corrobora a partir del análisis estadístico, ya que la concentración en el afluente siempre fue mayor que la del efluente, registrando una disminución en este parámetro. Es importante tener presente que la cantidad de datos es muy poco para intentar predecir el comportamiento de los parámetros DQO_{filtrada}, DBO₅ y NTK.

5.4. Variables de Respuesta Microbiológicas

La Figura 28 muestra el comportamiento de los resultados obtenidos de los análisis de coliformes fecales de los puntos de muestreo entrada y salida de la LAAT. Los datos de entrada presentaron una variabilidad con tendencia creciente durante las primeras cuatro muestras analizadas, después se presentó un drástico decrecimiento de los valores alcanzando el resultado más alto en la muestra No. 4 (5.3×10^4 NMP/100 mL). Los datos de salida presentaron una amplia variabilidad, alcanzando el máximo valor en la muestra analizada No. 5 (9.2×10^4 NMP/100 mL). Si solo se tienen en cuenta aquellos valores en los que la entrada es mayor que la salida (muestras analizadas No. 4 y 6) se podría establecer un promedio del porcentaje de disminución de coliformes fecales del 69% alcanzado por la LAAT.

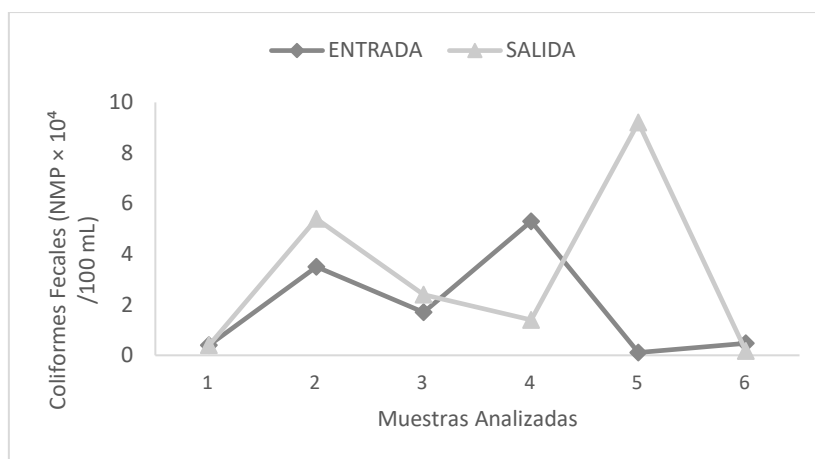


Figura 28. Comportamiento coliformes fecales

Durante la fase de experimentación, la LAAT presentó variaciones de pH (4.19-8.15 unidades de pH), OD (0-14.58 mg/L), ORP (condiciones anóxicas y aerobias) y temperatura (22 y 33 °C). Los microorganismos mesófilos crecen a temperaturas óptimas que oscilan entre 20 y 40 °C, la presencia de un número elevado de bacterias aerobias mesófilas significa que pudo haberse presentado condiciones favorables para la multiplicación de microorganismos patógenos de origen humano o animal. Con base en lo anterior y teniendo en cuenta que los coliformes fecales funcionan como una alerta que ocurrió contaminación fecal, pero no identifican el origen de esta, se podría establecer que dentro de la LAAT se presentaron condiciones ideales para el crecimiento de coliformes fecales presentes en el afluente de la unidad algal o que posiblemente ocurrió un proceso de contaminación por materia fecal de animales de sangre caliente (mamíferos y aves) debido a que la LAAT se encontraba a la intemperie, algo que también fue reportado por Larrea et al. (2013). Adicionalmente, las muestras fueron tomadas en las horas de la mañana, por lo que se esperaría una baja actividad biológica y pocas variaciones de pH, temperatura y radiación solar, evitando posiblemente que se presentaran mecanismos de disminución de patógenos.

La Figura 29 evidencia el comportamiento de los resultados obtenidos en los análisis de *Escherichia Coli* (*E. Coli*) de los puntos de muestreo entrada y salida de la LAAT. Los datos de entrada presentan poca variabilidad alcanzando el máximo valor en la muestra analizada No. 3 (1.3×10^4 NMP/100 mL), los datos de salida presentan mayor variabilidad en comparación con los datos de la entrada, alcanzando el máximo valor en la muestra analizada No. 5 (5.4×10^4 NMP/100 mL). En aquellos valores en los que la entrada es mayor que la salida (muestras analizadas No. 2 y 6), se obtuvo un porcentaje de disminución de *E. Coli* del 35%, aunque no se aprecie una diferencia significativa entre los resultados de entrada y salida de las muestras.

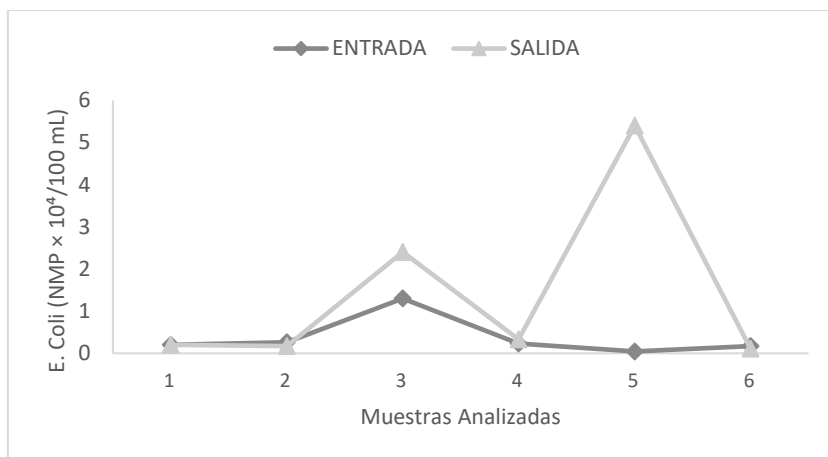


Figura 29. Comportamiento *Escherichia Coli*

Al igual que los coliformes fecales, *E. Coli* es un indicador de contaminación fecal, estas bacterias se multiplican a temperaturas entre 6 y 50° C (temperatura óptima alrededor de 37° C) y a valores de pH que oscilan entre 4 y 10 unidades de pH (pH óptimo entre 6 y 7 unidades) (Elika, 2013). Si se tiene en cuenta los rangos de pH y temperatura que se registraron durante la fase de experimentación, se podría establecer que LAAT presentó condiciones favorables para la reproducción de *E. Coli*, adicionalmente el que la LAAT haya estado ubicada en el exterior (intemperie) a lo mejor propicio la contaminación de heces fecales por parte de animales homeotérmicos (especialmente aves). Craggs et al. (2012) en el estudio del tratamiento del agua residual proveniente de la sedimentación primaria realizada en la PTAR de Christchurch en Nueva Zelanda, por medio de un sistema de tratamiento compuesto por 4 LAAT (5 ha), registraron una disminución del sistema en conjunto de ~2 log (~98.95%) de *E. Coli*, valor que se encuentra alejado del reportado en el marco de este proyecto.

De las muestras recolectadas y enviadas para analizar la presencia de huevos de helminto del afluente y efluente de la LAAT, no se encontraron presencia de estos.

5.5. Cumplimiento de la Normativa

La Tabla 16 y la Tabla 17 presentan los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, los límites máximos permisibles vertimientos que descargan a un alcantarillado público y los criterios de calidad para el uso de agua residual tratada en zonas verdes y jardines. Adicionalmente, la Tabla 16 y la Tabla 17 presentan los resultados obtenidos por el acople tecnológico (tanque de sedimentación, reactor fotocatalítico y LAAT) durante el tratamiento del agua residual del campus universitario Meléndez, con el propósito de evidenciar el cumplimiento o no de la reglamentación vigente.

Tabla 16. Comparación de los resultados obtenidos en el efluente de la LAAT con la legislación colombiana de vertimientos sobre alcantarillado público

Parámetros Físicoquímicos	Unidades	Resolución No. 0631 de 2015 Artículo No. 8	Efluente Acople Tecnológico	% de disminución	Cumple
Temperatura	°C	≥ 40	27.27	-	Si
pH	Unidades de pH	6-9	4.28-8.21	-	Si
DQO	mg O ₂ /L	225	173.1	64%	Si
DBO ₅	mg O ₂ /L	75	21.3	58%	Si
SST	mg/L	75	73.7	% negativo ⁵	No

Tabla 17. Comparación de los resultados obtenidos en el efluente de la LAAT con la legislación colombiana del uso de agua residual tratada

Parámetros	Unidades	Resolución No. 1207 de 2014 Artículo No. 16	Efluente Acople Tecnológico	Cumple
pH	Unidades de pH	6-9	4.28-8.21	Si
Conductividad	μS/cm	1,500	1,007.7	Si
Coliformes fecales	NMP/100 mL	1 × 10 ⁴	3 × 10 ⁴	No
Helminthos parásitos humanos	Huevos y Larvas/L	1	0	Si
Nitratos	mg/L	5	31.3	No

La Tabla 16 permite evidenciar que el efluente del acople tecnológico cumple con casi todos los parámetros físicoquímicos relacionados con la Resolución No. 0631 de 2015 (Artículo No. 16) en la cual se establecen los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de agua residual no doméstica – ARnD al alcantarillado público. El pH sería el único parámetro con el que no se cumplió, debido a las variaciones que se presentaron durante la fase de experimentación, pero si no se tienen en cuenta los datos atípicos reportados para este parámetro se podría establecer que el pH del efluente de la LAAT se encontró dentro del rango establecido por la norma. Los resultados de fósforo total, nitratos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total y alcalinidad deberán ser analizados y reportados ante la autoridad ambiental competente, el DAGMA o EMCALI para el caso particular del efluente del acople tecnológico evaluado en el marco de esta investigación.

En cuanto a los valores límites máximos permisibles para el uso de agua residual tratada específicamente en zonas verdes y jardines, la Tabla 17 muestra como el efluente de la LAAT no cumple con algunos de los parámetros establecidos en la Resolución No. 1207 de 2014. Los valores de pH bajo podrían afectar el suelo, acidificándolo y evitando que los nutrientes no se encuentren disponible para las plantas (pH para cultivos ornamentales oscila entre 5.5 y 6.8 unidades) (Barbaro et al., 2014).

Los resultados de coliformes fecales como se mencionó en la sección 4.7, posiblemente estuvieron relacionados con las condiciones que se presentaron dentro la LAAT que permitieron el crecimiento de este tipo de bacterias o con la posible contaminación de heces fecales por parte de animales homeotérmicos (especialmente aves). Las altas concentraciones

⁵ Aumento en la concentración de SST a la salida de la LAAT.

de nitratos podrían resultar en niveles tóxicos afectando la variación de la reacción del suelo (acidificación o alcalinización) y la actividad biológica del suelo presentado repercusiones sobre la dinámica global de nutrientes (Martínez et al., 2011).

Con base en lo anterior se podría pensar en cubrir la LAAT con un material que permita el paso de la luz solar para no afectar la fotosíntesis pero que evite la contaminación de heces fecales de animales de sangre caliente (especialmente aves). Adicionalmente, para el cumplimiento total de los parámetros establecidos en las Resoluciones No. 0631 de 2015 y No. 1207 de 2014, se podría pensar en un sistema de recolección de agua lluvia aplicable a la universidad, con el propósito de utilizar esta agua para diluir el efluente de la LAAT y así cumplir con todos los parámetros establecidos en la legislación colombiana.

5.6. Taxonomía de Microalgas

Se identificaron 3 tipos de algas durante el análisis taxonómico del agua de la LAAT, estos pertenecen a la clase *Chlorophyceae* y son las especies: *Parachollera Kessleri*, *Scenedesmus Obliquus* y *Scenedesmus Baculiformis*. Las últimas dos especies no se encontraban dentro del inóculo al momento de realizar el llenado de la LAAT, por lo que se cree que llegaron por acción natural ya que los microorganismos incluyendo las microalgas se encuentran en todas partes (ubicuidad). El género *Scenedesmus* se encuentra presente en aguas contaminadas, estas a su vez son utilizadas en el tratamiento de agua residual debido a los altos niveles de tolerancia que presentan a contaminantes, adicionalmente son comercialmente interesantes para la alimentación de animales, obtención de biocombustibles, aceites esenciales, entre otros usos (Hernández y Labbé, 2014).

La Tabla 18 evidencia un resumen de los diferentes estudios encontrados en el tratamiento de agua residual por medio de grupos algales, el tipo de agua residual que se implementó y los resultados obtenidos en términos de disminución de contaminantes.

Tabla 18. Tratamiento de agua residual por medio de grupos algales

Grupo Algal	Sustrato	Tecnología	Resultados en Términos de Disminución de Parámetros	Referencia
Consortio <i>Parachollera</i> <i>Kessleri-bacteria</i>	Agua residual sintética	-	DQO: 61,7%	Darwich (2017)
Consortio <i>Chlorella</i> <i>sp-bacteria</i>	Agua residual proveniente de una granja lechera comercial de tamaño mediano	-	Contaminantes: 98%	Hena et al. (2015)
Consortio <i>Chlorella</i> <i>sp-bacteria</i>	Lodo municipal digerido	Fotobiorreactor semicontinuo en condiciones de luz natural	NTK: 65% PT: 72% DQO: 8%	Halfhide et al. (2015)
<i>Chlorella sp</i>	Agua residual doméstica Universidad Autónoma de	Fotobiorreactores agitados por burbujeo	NH ₄ ⁺ > 50% DQO: Aumentó	Viveros (2015)

Occidente				
<i>Scenedesmus sp.</i>	Agua residual industrial, empresa textil	-	NO ₃ ⁻ : 99,81% NO ₂ ⁻ : 99,9% DQO y DBO ₅ : 25,2%	Pérez et al. (2016)
<i>Scenedesmus sp.</i>	Agua residual doméstica	-	PT: 65% NTK: 80% NO ₃ ⁻ : 25%	Acevedo et al. (2017)
<i>Scenedesmus sp.</i> , <i>Chlorella sp.</i> ,	Lixiviado	Laguna algal de alta tasa	P- PO ₄ ⁻³ : 8,2% DQO: 31,5% DBO ₅ : 71%	Cerón (2014)

Si se realiza una comparación de los resultados obtenidos en el marco de este proyecto y los presentados en la Tabla 18, se podría afirmar que en términos de disminución de materia orgánica expresada como: DQO y DBO₅, la LAAT presentó mayores porcentajes de disminución en comparación con los otros estudios. En cuanto a la disminución de compuestos como: NH₄⁺, NO₃⁻, NTK y PT, la LAAT registró menores porcentajes de disminución en comparación con los diferentes estudios. Con base en lo anterior, se podría establecer que las características del agua residual, el grupo algal empleado para el tratamiento y las condiciones de experimentación afectan las eficiencias de disminución de contaminantes y nutrientes presentes en el agua residual.

5.7. Estimación de Biomasa Algal y Clorofila *a*

La Figura 30 evidencia el comportamiento de la radiación solar en los dos días en los que se realizaron las tomas de muestra para la estimación de clorofila *a* y biomasa algal, estos días presentaron una tendencia similar en los valores obtenidos de las 6:30 a.m. hasta aproximadamente las 10:30 a.m. y de las 4:30 p.m. hasta la última medición del día (7:30 p.m.). El miércoles 6 de diciembre registró mayores valores de radiación solar que el miércoles 13 de diciembre durante el periodo comprendido entre las 10:30 a.m. y las 2:30 p.m., situación contraria a la que se presentó durante las mediciones realizadas entre las 2:30 p.m. y las 4:30 p.m., aunque la diferencia entre estos dos días no sea muy significativa. El pico de mayor radiación para el día 6 de diciembre se presentó a las 12:30 p.m. (210 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$) mientras que para el día 13 de diciembre se presentó a las 10:30 a.m. (199 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$). Los cambios en el comportamiento de la radiación solar afectan la fotosíntesis debido a que en este proceso se presenta la transformación de la energía luminosa en energía química de enlace (Ocampo, 2014).

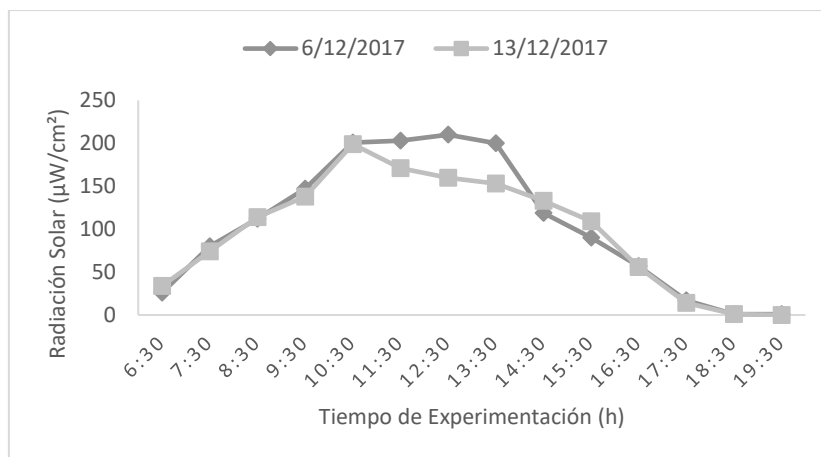


Figura 30. Comportamiento radiación solar

En la Figura 31 y la Figura 32 se observa como la clorofila *a* se ve afectada por las variaciones de luz durante el día, debido a que una disminución en la radiación solar hace que la clorofila *a* disminuya por lo que se esperaría que la actividad fotosintética también decrezca. La Figura 31 muestra una variabilidad de los datos de clorofila *a* durante las primeras 4 horas (6:30-10:30 a.m.) con una tendencia creciente, a partir de las 10:30 a.m. y hasta las 2:30 p.m. la clorofila *a* muestra un comportamiento creciente, este comportamiento posiblemente se presentó debido a la ubicación de la LAAT ya que desde aproximadamente las 9:30 a.m. y hasta las 2:30 p.m. no se registraban situaciones (sombra) que impidieran el paso de la luz solar según las observaciones realizadas durante la fase de experimentación. Finalmente, durante el periodo comprendido entre las 2:30 y las 7:30 p.m. se observa una tendencia decreciente tanto de la clorofila *a* como de la radiación solar hasta finalizar el tiempo de experimentación. Es importante tener en cuenta que los tanques ubicados detrás de las LAAT generaban sombra sobre esta después de aproximadamente las 3:00 p.m., lo que podría explicar la disminución de la radiación solar y la clorofila *a*.

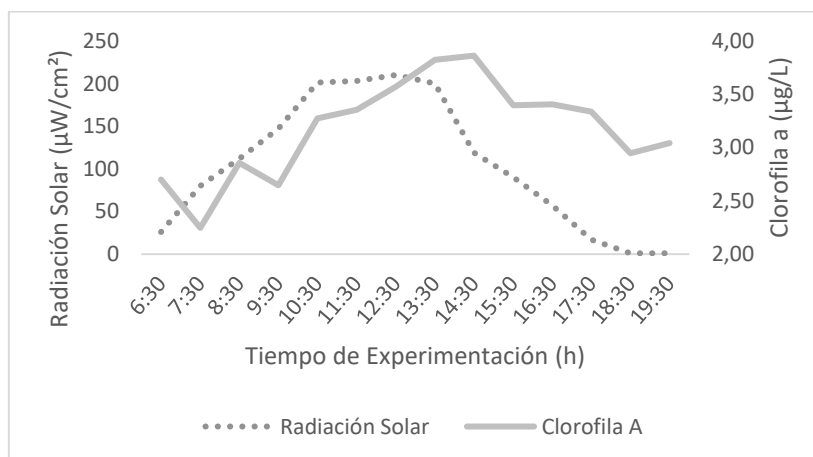


Figura 31. Relación entre clorofila *a* y radiación solar (diciembre 6 de 2017)

Por su parte, en la Figura 32 se observa una variabilidad de los valores de clorofila *a* durante las primeras tres horas (6:30-9:30 a.m.) con una tendencia creciente, a partir de las 9:30 a.m. y hasta el final del día se evidencia una variabilidad de los datos de clorofila *a* con una tendencia

decreciente y un comportamiento descendente de la radiación solar desde las 10:30 a.m. hasta finalizada la jornada de monitorio. El mayor valor de clorofila *a* se presentó a las 9:30 a.m. (6.32 $\mu\text{g/l}$).

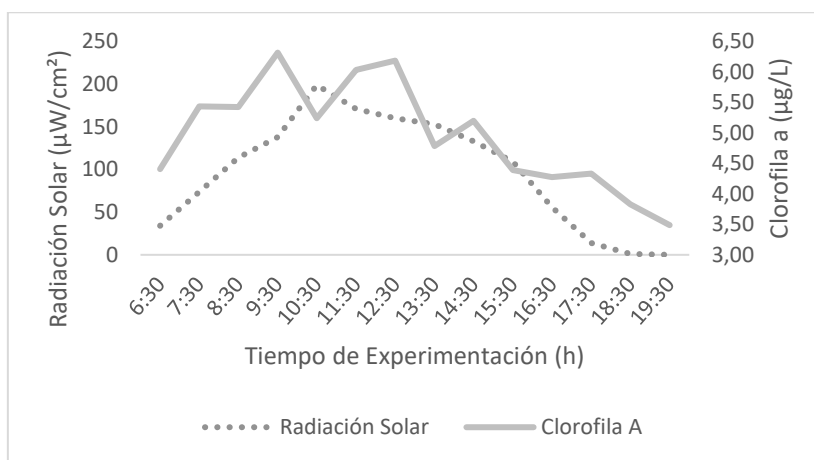


Figura 32. Relación entre clorofila *a* y radiación solar (diciembre 13 de 2017)

En la Figura 33 se puede apreciar el comportamiento de la biomasa algal durante los dos días en los que se tomaron muestras. A pesar de que el comportamiento de la radiación solar durante los dos días presentó una tendencia similar, en la Figura 33 se evidencia una notable diferencia en la concentración de biomasa durante dichos días, lo que permite afirmar que durante el día 13 de diciembre presentó mayor concentración de biomasa en la LAAT a diferencia del día 6 de diciembre. Los mayores valores de biomasa algal de los días 6 y 13 de diciembre se presentaron en los horarios de las 9:30 a.m. (421.23 mg/L) y las 2:30 p.m. (257.45 mg/L) respectivamente.

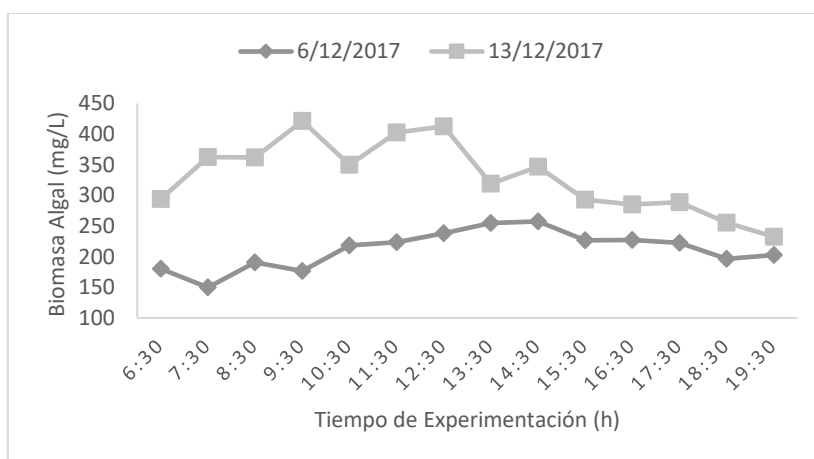


Figura 33. Comportamiento biomasa algal

Una vez se determinó la proporción de biomasa promedio para los dos días de experimentación, se calculó la productividad volumétrica y por área. Para el día 6 de diciembre se obtuvo una productividad volumétrica de $196 \text{ g/m}^3 \times \text{d}$ y por área de $42.34 \text{ g/m}^2 \times \text{d}$, mientras que para el día 13 de diciembre se registró una productividad volumétrica de $305.81 \text{ g/m}^3 \times \text{d}$ y por área de $66.05 \text{ g/m}^2 \times \text{d}$. En términos generales, los buenos resultados en la

productividad algal se encuentran relacionados con las condiciones de mezcla, el diseño del sistema (profundidades bajas) y la síntesis de nutrientes (Gutiérrez, 2012)

Los resultados obtenidos en el marco de esta investigación difieren significativamente de los resultados (productividad volumétrica: $37.2 \text{ g/m}^3 \times \text{d}$, productividad por área: $7.2 \text{ g/m}^2 \times \text{d}$) reportados por Cerón (2014), es posible que las diferencias se encuentren relacionadas principalmente con el tiempo de experimentación y el tamaño de las unidades de tratamiento, debido a que Cerón (2014) monitoreó con una LAAT de 0.28 m^3 y un área de 1.44 m^2 por 29 semanas, mientras que en el marco de este proyecto se monitoreó una LAAT de 0.084 m^3 y un área de 0.21 m^2 por 2 días en términos de clorofila *a*. Adicionalmente, las características del agua residual tratada durante las dos investigaciones (lixiviado y agua residual de campus universitario) posiblemente afectaron la productividad de las unidades.

6. CONCLUSIONES

- A pesar de no contar con información oficial sobre las características y el tratamiento de agua residual de campus universitarios, el sistema de laguna algal de alta tasa obtuvo resultados importantes en términos de disminución de materia orgánica, nutrientes y parámetros microbiológicos, considerando la unidad algal como un tratamiento terciario.
- El sistema de laguna algal de alta tasa favoreció la disminución de materia orgánica expresada como: $DQO_{filtrada}$, DBO_5 y COD alcanzando promedios de disminución del 64, 58 y 48% respectivamente. En cuanto a los SST, el aumento en la concentración a la salida de la laguna se debió a la generación de biomasa (especialmente algas) que se presentó en la unidad de tratamiento.
- Durante la investigación, la laguna algal de alta tasa presentó un desempeño adecuado en la reducción de especies de nitrógeno como NH_4^+ y NTK, alcanzando promedios de disminución del 37 y 44% respectivamente. Con respecto al NO_3^- , la concentración a la salida de la unidad aumentó, por lo que es posible que dentro de la laguna haya existido un proceso de nitrificación.
- Pese a que el contenido de fósforo en las microalgas es menor al 1%, la unidad de laguna algal de alta tasa alcanzó un promedio de disminución del fósforo del 15% debido posiblemente al proceso de precipitación de este compuesto o la incorporación al interior de la biomasa algal.
- El sistema de laguna algal no favoreció la reducción de contaminación microbiológica expresada como: Coliformes Fecales y E. Coli, posiblemente debido a las condiciones que se presentaron dentro del sistema algal y a la ubicación de la unidad (intemperie). En cuanto a los Huevos de Helminto, de las muestras recolectadas y enviadas para ser analizadas no se encontraron presencia de estos.
- Dos de las tres especies encontradas en la laguna algal de alta tasa no fueron introducidas al sistema, por lo que se podría pensar que durante la fase de experimentación se presentó un proceso de selección natural.
- La productividad algal alcanzada por la laguna algal de alta tasa a escala piloto para el día 6 de diciembre fue de $196 \text{ g/m}^3 \times \text{d}$ (volumétrica) y $42.34 \text{ g/m}^2 \times \text{d}$ (área), mientras que para el día 13 de diciembre fue de $305.81 \text{ g/m}^3 \times \text{d}$ (volumétrica) y de $66.05 \text{ g/m}^2 \times \text{d}$ (área). Los resultados obtenidos permiten establecer la posibilidad del aprovechamiento de la biomasa algal.

7. RECOMENDACIONES

- Para posteriores investigaciones se recomienda monitorear el sistema por más tiempo (mínimo 6 meses) y con base en los resultados obtenidos evaluar la posibilidad de escalar la laguna algal de alta tasa a un tamaño mayor al implementado durante el presente trabajo.
- Para futuras investigaciones se recomienda realizar ensayos con diferentes acoples con el propósito de evidenciar el efecto de la calidad del agua sobre el rendimiento de la laguna algal de alta tasa.
- Se sugiere evaluar el sistema de laguna algal de alta tasa durante el día y la noche por un tiempo mínimo de 6 meses, con el propósito de evidenciar los cambios que presentaría la unidad en términos de eficiencia de disminución de materia orgánica, nutrientes y parámetros microbiológicos.
- Para futuras investigaciones se sugiere realizar un trabajo intenso sobre la dinámica algal que incluya mecanismos de eliminación que permitan conocer que están realizando las algas y que asociaciones algal-bacteria se presentan en estos sistemas.
- Se sugiere estudiar la potencialidad del efluente de la laguna algal como alimento para animales, uso para riego y generación de energía.
- Se sugiere realizar un diagnóstico ambiental de la calidad del agua residual proveniente de los laboratorios de la Universidad el Valle.

8. BIBLIOGRAFIA

- Acevedo, S., Pino, N. y Peñuela, G. (2017). Remoción de nitrógeno, fósforo y producción de biomasa de *Scenedesmus* sp. en agua residual doméstica. *Ingeniería y Competitividad*, 19(1), 177-185.
- AccuWeather. (2018). El tiempo del mes para Cali 2017 – Pronóstico de AccuWeather para Valle del Cauca Colombia. Recuperado de: <https://www.accuweather.com/es/co/cali/111732/month/111732?monyr=11/01/2017>
- Aguirre, P., Álvarez, E., Ferrer, I., y García, J. (2011). Treatment of piggery wastewater in experimental high rate algal ponds. *Biotechnol Amb Algal*, 2(2), 57-66.
- Arbib, Z., Ruiz, J., Álvarez, P., Garrido, C., Barragan, J. y Perales, J. (2013). Long term outdoor operation of a tubular airlift pilot photobioreactor and a high rate algal pond as tertiary treatment of urban wastewater. *Ecological Engineering*, 52, 143-153.
- Barbaro, L., Karlanian, M., y Mata, D. (2014). Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica (CE) en los sustratos para plantas. Ministerio de agricultura, ganadería y pesca, Buenos Aires, Argentina.
- Bicudo, C. y Menezes, N. (2006). *Generos de algas de aguas continentales Do Brasil. Chave para identificacao e descricoes* 2^{ed}, RIMA.
- Cardona, S. y Cobo, E. (2014). Guía de Buenas Prácticas Ambientales de la Universidad del Valle. Recuperado de: <http://serviciosvarios.univalle.edu.co/documentos-de-interes>.
- Cerón, V. (2014). Estudio de la capacidad de biofijación de CO₂ de una Laguna Algal de Alta Tasa en condiciones del trópico (Tesis de maestría). Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
- Cerón, V., Peña, M. y Madera, C. (2015). Uso de lagunas algales de alta tasa para tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería y Desarrollo*, 33(1), 98-125.
- 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 de doctorado). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Comas, A. (1996). *Las Chlocooccales dulciacuícolas de Cuba*, J. CRAMER.
- Correa, G. (2008). Evaluación y monitoreo del sistema de lagunas de estabilización del municipio de Santa Fé de Antioquia, Colombia (Tesis de maestría). Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

- Craggs, R., Sutherland, D. y Campbell, H. (2012) Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production. *Applied Phycology*, 24(3), 329-337.
- Darwich, M. (2017). Evaluación del consorcio natural alga (Parachlorella Kessleri) (Chlorophyceae)- bacteria en depuración de aguas residuales sintéticas (Tesis de pregrado). Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
- Díaz, E., Alavarado, A. y Camacho, K. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. *Quivera*, 14(1), 78-97.
- Escobar, L., Rojas, J., Ariel, J. y Cobo, E. (2009). Documento en Discusión. Construcción de la política ambiental en Univalle: Cultivando el reto de hacer Universidad. Universidad del Valle. Recuperado de: <https://politicaambientalunivalle.files.wordpress.com/2013/02/politica-ambiental-universitaria.pdf>
- Feijoo, V. y Perea, A. (2014). Aprovechamiento de Agua Lluvia como Alternativa para el Ahorro de Agua Potable en la Universidad del Valle Sede Meléndez (Tesis de pregrado). Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
- Fructuoso M. (2015). Diseño y estudio de viabilidad de una planta depuradora mediante lagunas de alta carga (Tesis de especialización). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Fundación Vasca para la Seguridad Agroalimentaria – Eliko. (2013). Echericha Coli. Recuperado de: http://www.eliko.eus/datos/pdfs_agrupados/Documento84/3.Ecoli.pdf
- Galarza, A. (2014). La educación ambiental a nivel superior. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- Godos, I., Blanco, S., García-Encina, P., Becares, E. y Muñoz, R. (2010). Influence of flue gas sparging on the performance of high rate algae ponds treating agro-industrial wastewaters. *Hazardous Materials*, 179(1), 1049-1054.
- Gutiérrez, R. (2012). Producción de biomasa algal en lagunas de alta carga para la depuración de aguas residuales (Tesis de especialización). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Halfhide, T., Dalrymple, O., Wilkie, A., Trimmer, J., Gillie, B., Udom, I., Zhang, Q. y Ergas, S. (2015). Growth of an indigenous algal consortium on anaerobically digested municipal sludge centrate: photobioreactor performance and modeling. *Bioenergy Research*, 8(1), 249-258.

- Hamouri, B., Khallayoune, K., Bouzoubaa, K., Rhallabi, N., y Chalabi, M. (1994). High-rate algal pond performances in faecal coliforms and helminth egg removals. *Water research*, 28(1), 171-174.
- Hena, S., Fatimah, S. y Tabassum, S. (2015). Cultivation of algae consortium in a dairy farm wastewater for biodiesel production. *Water Resources and Industry*, 10, 1-14.
- Hernández, A. y Labbé J. (2014). Microalgas, cultivos y beneficios. *Biología Marina y Oceanografía*, 49(2), 157-173.
- Holguín, J. (2015). Aproximación a la huella hídrica en la Universidad Autónoma de Occidente. Recuperado de: <https://campussostenible.org/wp-content/uploads/2017/04/anexo-12-huella-hidrica-2015.pdf>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (s.f). Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>
- Jaramillo, M. (2010). Potencial de reuso de agua residual doméstica como estrategia para el control de la contaminación por agua residual en el valle geográfico del río Cauca (Tesis de maestría). Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
- Larrea, J., Rojas, M., Romeu, B., Rojas, N. y Heydrich, M. (2013). Bacterias indicadoras de contaminación fecal en la evaluación de la calidad de las aguas: revisión de la literatura. *Ciencias Biológicas*, 44(2), 24-34.
- Lizcano, W., Benítez, N., Mena, N., Urresta, J. y Madera, C. (2015). Evaluación de un Acople Tecnológico para el Tratamiento de la Aguas Residuales Domesticas y el Potencial Uso de los Subproductos generados Caso de estudios: Campus Universidad del Valle Sede Meléndez (convocatoria interna No. 4-2015, código del proyecto 71030). Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
- López, N. (2014). Programa de Uso Racional y Eficiente del Agua en la Universidad del Valle – Meléndez. Recuperado de: <http://docplayer.es/18194649-Programa-de-uso-racional-y-eficiente-del-agua-en-la-universidad-del-valle-melendez-presentado-por-natalia-lopez-moreno-ingeniera-sanitaria.html>
- Luna, V. y Ramírez, H. (2004). Medios de soporte alternativos para la remoción de fósforo en humedales artificiales. *Contaminación Ambiental*, 20(1), 31-38.

- Marín, J. y Correa, J. (2010). Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la *Guadua angustifolia* Kunth. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
- Martínez, A. (2011). Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróbicamente (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Martínez, F., Ojeda, D., Hernández, A., Martínez, J., y Quezada, G. (2011). El exceso de nitratos: un problema actual en la agricultura. *Synthesis*, 11-16.
- Mena, N. (2014). Tratamiento de lixiviados mediante ozonización catalítica heterogénea (Tesis de maestría). Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
- Metcalf, E. y Eddy, H. (2003). Wastewater engineer treatment disposal, reuse. New York: McGraw.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS. (17 de marzo de 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficial y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. [Resolución No. 0631 de 2015]. DO: 49.486
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS. (25 de julio de 2014). Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. [Resolución No. 1207 de 2014]. DO: 49.242
- Ministerio de Educación Nacional - MEN. (10 de septiembre 2013). Humedal de Guaymaral, prioridad de protección ambiental – La Udca cuenta con planta de tratamiento terciaria de aguas residuales. Centro Virtual de Noticias de la educación. Recuperado de: <http://www.mineduacion.gov.co/cvn/1665/w3-article-328613.html>
- Ministerio de Educación Nacional - MEN. (2015). Educación Superior - Síntesis Estadística Nacional, Cobertura Educación Superior. Recuperado de: https://www.mineduacion.gov.co/1759/articles-358137_recurso_1.pdf
- Ministerio de Educación Nacional - MEN. (2016). Inscritos en Educación Superior – Colombia 2016, Sistema Nacional de Información de la Educación Superior – SNIES. Recuperado de: <http://www.mineduacion.gov.co/sistemasdeinformacion/1735/w3-article-212400.html>
- Montero, Y., Gallo A., Gómez, L., Álvarez, I., Sabina, L., Támbara Y., Álvarez A., Alfonso, M. & Ramírez, L. (2012). Productividad de lípidos y composición de ácidos grasos de cinco especies de microalgas. *Investigación y Saberes*, 1(2), 37-43.
- Ni, Z.; Kim, E. y Chen, Z. (2009). Chlorophyll and starch assays. *Protocol Exchange*, 488.

- Ocampo, N. (2014). Fotosíntesis. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca de Soto, México.
- Organización de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA. (2014). Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales. Recuperado de: http://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura - UNESCO. (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017, Aguas residuales: El recurso desaprovechado. Recuperado de: <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002476/247647s.pdf>
- Park, J. y Craggs, R. (2010). Wastewater treatment and algal production in high rate algal ponds with carbon dioxide addition. *Water Science and Technology*, 61(3), 633–639.
- Park, J. y Craggs, R. (2011). Algal production in wastewater treatment high rate algal ponds for potential biofuel use. *Water Science and Technology*, 63(10), 2403-2410.
- Park, J., Craggs, R. y Shilton, A. (2011). Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology*, 102(1), 35-42.
- Pérez, K., Vega, A., Hernández, L., Parra, D. y Ballen, M. (2016). Uso de Scenedesmus para la remoción de metales pesados y nutrientes de aguas residuales de la industria textil. *Ingeniería Solidaria*, 12(20), 95-105.
- R Development Core Team (2017) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Romero, M., Colín, A., Sánchez, E. y Ortiz, M. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Contaminación Ambiental*, 25(3), 157-167.
- Salazar, M. (2005). Aplicación e importancia de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales. *Contactos*, 59, 64-70.
- Sanabria, S., Restrepo, I. y Montoya, L. (2016). Compromiso ambiental universitario desde el ranking Green Metric. El caso de la Sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia. *Ambiente y Desarrollo*, 20(39), 21-34.
- Soriano, P. (2014). Planta demostración de depuración de aguas residuales con microalgas (Tesis de pregrado). Universidad de Almería, Almería, España.
- Standard methods for the examination of water and wastewater. 23^{ed}, United States: Public Health Association, 2017; American Water Works Association; Water Environment Federation (WEF).

- Suarez y Cardona. (2014). Diagnóstico Ambiental de la Universidad del Valle. Recuperado de: <https://drive.google.com/file/d/0B1gCDaKE9886bnI5aXFQZVN2X0U/view>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios - SSPD. (2014). Informe Técnico sobre Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en Colombia. Recuperado de: <http://www.superservicios.gov.co/content/download/8249/70093>
- Sutherland, D., Turnbull, M. y Craggs, R. J. (2017). Environmental drivers that influence microalgal species in fullscale wastewater treatment high rate algal ponds. *Water research*, 124, 504-512.
- UI GreenMetric. (2015a). Overall Rankings 2017. Recuperado de: <http://greenmetric.ui.ac.id/overall-ranking-2017/>
- UI GreenMetric. (2015b). UI GreenMetric World University Ranking Background of the ranking. Recuperado de: <http://greenmetric.ui.ac.id/what-is-greenmetric/>
- Universidad Ciencias Aplicadas y Ambientales - UDCA. (2016). Boletín Estadístico 2016-2 Universidad Ciencias Aplicadas y Ambientales. Recuperado de: https://www.udca.edu.co/wp-content/uploads/2017/04/6-bpletin-2016_2.pdf
- Universidad de Valle - UV. (2014). Anuario Estadístico Universidad del Valle 2014. Recuperado de: http://paginasweb.univalle.edu.co/~planeacion/Analisis/Documentos/DTrabajo/2014_a_nuario.pdf
- Universidad del Valle - UV. (2015). Plan Estratégico de Desarrollo 2015-2025. Recuperado de: http://paginasweb.univalle.edu.co/~planeacion/Analisis/Plan/pd2015-2025/revision/PED_2015-2025-31122016-Publicado.pdf
- Universidad Tecnológica de Pereira - UTP. (2009). Actualización del Diagnostico Ambiental Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado de: <http://media.utp.edu.co/centro-gestion-ambiental/archivos/documentos-estrategicos-de-gestion-ambiental-en-el-campus-utp/diagnostico-actual.pdf>
- Universidad Tecnológica de Pereira - UTP. (2013). Gestión Ambiental Universitaria Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado de: <http://media.utp.edu.co/centro-gestion-ambiental/archivos/GAUV8finalSBNv14.pdf>
- Venegas, C. (2015). Eliminación biológica de nutrientes en aguas residuales con alto contenido de nitrógeno amoniacal utilizando un reactor biológico secuencial (Tesis de doctorado). Universidad de Cantabria, Santander, España.
- Villa, A., Herazo, D., y Torregroza, A. (2014). Efecto del fotoperiodo sobre el crecimiento de la diatomea *Chaetoceros calcitrans* (clon c-cal) en cultivos estáticos. *Intropica*, 9, 111-117.

- Viveros, J. (2015). Evaluación de las aguas residuales domésticas de la universidad autónoma de occidente como medio de cultivo natural para la microalga nativa *Chlorella* sp. y simultáneamente su capacidad para remover nitrato y DQO de dichas aguas (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, Colombia.
- Winanti, E., Rahmadyanti, E. y Fajarwati, I. (2018). Ecological Approach of Campus Wastewater Treatment using Constructed Wetland. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 288(1), 012062.
- Zurita, F., Castellanos, O. y Rodríguez, A. (2011). El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Ciencias Agrícolas*, 2(1), 139-150.