

**VIABILIDAD TÉCNICA DEL SISTEMA CÉLULA DE COMBUSTIBLE
MICROBIANA-HUMEDAL ARTIFICIAL DE ALTA TASA PARA DEPURACIÓN
DE AGUAS RESIDUALES DE ALTA CARGA ORGÁNICA Y GENERACIÓN
ELÉCTRICA.**

ANGÉLICA CORZO HERNÁNDEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2016

**VIABILIDAD TÉCNICA DEL SISTEMA CÉLULA DE COMBUSTIBLE
MICROBIANA-HUMEDAL ARTIFICIAL DE ALTA TASA PARA DEPURACIÓN
DE AGUAS RESIDUALES DE ALTA CARGA ORGÁNICA Y GENERACIÓN
ELÉCTRICA.**

ANGÉLICA CORZO HERNÁNDEZ

Trabajo de grado para optar al título de
MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL

Director

OTONIEL SANABRIA ARTUNDUAGA

Ingeniero Civil, MsC, PhD.

Docente Universidad Nacional de Colombia

Codirector

MARIO GARCÍA SOLANO

Ingeniero Civil, MsC

Docente Universidad Industrial de Santander

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2016

AGRADECIMIENTOS

A los profesores Otoniel Sanabria y Mario García, por su apoyo en la dirección y codirección de esta investigación, sus consejos y ánimos.

Al laboratorio de Consultas Industriales de la Universidad Industrial de Santander por su apoyo en la realización de análisis de calidad del agua, sin los cuales esta tesis no habría sido posible.

A los estudiantes Elkin Peña y Jorge Díaz, por su colaboración en el cuidado del sistema experimental.

A mi familia, en especial mis hijas y esposo, por su apoyo incondicional y regalarme tiempo de nuestro tiempo,..... pronto lo recuperaremos.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
2 OBJETIVOS	23
2.1 GENERAL	23
2.2 ESPECÍFICOS	23
3 MARCO TEÓRICO.....	24
3.1 HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL	24
3.1.1 Tipologías.....	24
3.1.2 Procesos de eliminación de contaminantes.	30
3.2 HUMEDALES ARTIFICIALES DE ALTA TASA.....	34
3.3 CÉLULAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS	38
3.3.1 Principios de funcionamiento.....	38
3.3.2 Configuraciones de CCMs.....	42
3.3.3 Depuración de aguas residuales industriales agroalimentarias en CCMs	45
3.4 SISTEMA COMBINADO CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA- HUMEDAL ARTIFICIAL	47
4 MATERIALES Y MÉTODOS	52
4.1 MONTAJE EXPERIMENTAL.....	52
4.1.1 Estructura general	52
4.1.2 Célula de combustible microbiana.....	54
4.1.3 Vegetación	55
4.1.4 Inóculo.....	55

4.1.5	Agua residual	57
4.2	MONITOREO DEL MODELO CCM-HAAT	57
4.2.1	Etapa de arranque.....	58
4.2.2	Potencial Redox	62
4.2.3	Eliminación de materia orgánica	63
4.2.4	Generación de energía eléctrica	64
4.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	67
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	68
5.1	PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA.....	68
5.1.1	Temperatura.....	68
5.1.2	Oxígeno Disuelto.....	70
5.1.3	Potencial Redox	72
5.1.4	Demanda Química de Oxígeno	75
5.2	PARÁMETROS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	79
5.2.1	Voltaje	79
5.2.2	Potencial Redox	86
5.3	VIABILIDAD TÉCNICA DEL SISTEMA CCM-HAAT	89
6	CONCLUSIONES.....	94
6.1	LIMITACIONES DEL ESTUDIO	95
6.2	FUTURA INVESTIGACIÓN.....	95
	REFERENCIAS	97
	ANEXOS.....	109

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Concentraciones comparativas de aguas residuales industriales.....	35
Tabla 2. Desempeño de CCMs utilizando aguas residuales agroalimentarias como sustrato	46
Tabla 3. Eficiencia de remoción de DQO y densidad de potencia en HA-CCM.....	50
Tabla 4. Resultados de Análisis Fitopatológicos. *Indica la enfermedad causada por el microorganismo.....	59
Tabla 5. Esquema de monitoreo	61
Tabla 6. Comparación humedales artificiales-celdas de combustible microbianas	91
Tabla 7. Valores de Temperatura muestreo Fase I Carga 100 g DQO/m ² -d	109
Tabla 8. Valores de Temperatura muestreo Fase II- Carga 100 g DQO/m ² -d	109
Tabla 9. Valores de Temperatura muestreo Fase II- Carga 200 g DQO/m ² -d	109
Tabla 10. Valores de Oxígeno Disuelto muestreo Fase I- Carga 100 g DQO/m ² -d	109
Tabla 11. Valores de Oxígeno Disuelto muestreo Fase II- Carga 100 g DQO/m ² -d	110
Tabla 12. Valores de Oxígeno Disuelto muestreo Fase II- Carga 200 g DQO/m ² -d	110
Tabla 13. Valores de Potencial Redox muestreo Fase I- Carga 100 g DQO/m ² -d	110
Tabla 14. Valores de Potencial Redox muestreo Fase II- Carga 100 g DQO/m ² -d	110
Tabla 15. Valores de Potencial Redox muestreo Fase II- Carga 200 g DQO/m ² -d	110
Tabla 16. Valores de DQO muestreo Fase I- Carga 100 g DQO/m ² -d	111
Tabla 17. Valores de DQO muestreo Fase II- Carga 100 g DQO/m ² -d	111
Tabla 18. Valores de DQO muestreo Fase II- Carga 200 g DQO/m ² -d	111
Tabla 19. Voltaje diario Fase I-Carga 100 g DQO/m ² -d.....	151
Tabla 20. Voltaje diario Fase II-Carga 100 y 200 g DQO/m ² -d	152

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Investigación en tópicos de tecnologías de recuperación de energía a través de sistemas de tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica. Celdas de combustible microbianas (CCM), procesos biológicos de producción de hidrógeno (BioH ₂), procesos con micro algas (M-Algas), y valorización energética de fangos (ThV-Fangos).....	20
Figura 2. Humedal Construido de Flujo Subsuperficial: (a) Horizontal, (b) Vertical	27
Figura 3. Procesos de Depuración de Aguas Residuales Urbanas	30
Figura 4. Procesos metabólicos de humedales construidos en escala de potencial redox.....	31
Figura 5. Medio de soporte plástico BIOSPHERE.	36
Figura 6. Medio de soporte plástico versión II “Rootfill”.	37
Figura 7. Esquema de una CCM de dos cámaras.	39
Figura 8. Configuraciones de Celdas de Combustible Microbianas.....	44
Figura 9. Configuraciones de prototipos de humedales artificiales-CCM.....	48
Figura 10. Sistema experimental CCM-HAAT.....	53
Figura 11. Esquema de vista lateral del sistema CCM-HAAT.....	54
Figura 12. Esquema de células de combustible microbianas. (a) montaje, (b) materiales.	54
Figura 13. Macrofitas utilizadas en el montaje experimental.	55
Figura 14. Ficha Técnica Biodyne®.....	56
Figura 15. Montaje experimental con tres especies de macrofitas.	58
Figura 16. Imagen del Montaje experimental CCM-HAAT.....	60
Figura 17. Esquema de monitoreo.....	61
Figura 18. Equipo medición Eh.....	62
Figura 19. Equipo para medición de temperatura y oxígeno disuelto.	63
Figura 20. Equipo de medición de Voltaje, (a) en el ensayo en continuo, (b) descarga de datos.	64

Figura 21. Mediana y Desviación estándar de Temperatura en afluente y efluentes, según fase y carga orgánica aplicada.....	69
Figura 22. Mediana y Desviación estándar de Oxígeno Disuelto en afluente y efluentes, según fase y carga orgánica aplicada.	70
Figura 23. Mediana y Desviación estándar de Potencial Redox en afluente y efluentes, según fase y carga orgánica aplicada.	73
Figura 24. Mediana y Desviación estándar de DQO en afluente y efluentes, según fase y carga orgánica aplicada.	75
Figura 25. Evolución de eficiencias de remoción en efluentes.	77
Figura 26. Voltaje diario, por línea en la Fase I-Carga 100 g DQO/m ² -d.	80
Figura 27. Voltaje diario, por línea en la Fase II.....	81
Figura 28. Voltaje en continuo-Fase I	83
Figura 29. Voltaje en continuo-Fase II	84
Figura 30. Potencial redox en ánodo y cátodo, por línea en la Fase I-Carga 100 g DQO/m ² -d.	87
Figura 31. Potencial redox en ánodo y cátodo, por línea en la Fase II-Carga 200 g DQO/m ² -d.	88
Figura 32. Comparación Gradiente Redox y Voltaje por Fase.....	89

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. PARÁMETROS MEDIDOS IN SITU.....	109
ANEXO B. RESULTADOS ANÁLISIS DE DQO.....	111
ANEXO C. INFORMES DE ANÁLISIS DE LABORATORIO	112
ANEXO D. DATOS SEGUIMIENTO DIARIO VOLTAJE	151

RESUMEN

TÍTULO: VIABILIDAD TÉCNICA DEL SISTEMA CÉLULA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA-HUMEDAL ARTIFICIAL DE ALTA TASA PARA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE ALTA CARGA ORGÁNICA Y GENERACIÓN ELÉCTRICA.*

Autor: Angélica Corzo Hernández**

Palabras clave: Células de combustible microbianas, Humedales artificiales, eficiencia de remoción, potencial redox, voltaje.

Una nueva tecnología integrando células de combustible microbianas y humedales artificiales de alta tasa (CCM-HAAT) se ha planteado, con base en la sinergia y los requerimientos en común para su funcionamiento, destacándose entre ellos el potencial de óxido-reducción. En humedales artificiales, el gradiente redox en la columna de agua permite contar con zonas aeróbicas cerca de la superficie, y anaeróbicas en el fondo. En CCMs, bacterias electrogénicas oxidan sustratos orgánicos y transfieren electrones a un circuito eléctrico para producir energía, utilizando el gradiente redox entre electrodos. La unión de estas dos tecnologías puede permitir depurar aguas residuales de alta carga orgánica y generar energía simultáneamente, por tal razón, el principal objetivo de esta investigación es determinar su viabilidad técnica. Un estudio exploratorio fue llevado a cabo en un sistema experimental, conformado por tres líneas de HAAT integrando CCMs, dos líneas fueron plantadas con *Cyperus alternifolius*, la restante permaneció sin vegetación actuando como control, depurando agua residual sintética con cargas de 100 y 200 gr DQO/m²-d, en dos fases (con y sin oxígeno suplementario). Las mejores condiciones de desempeño correspondieron a eficiencias de remoción de 65% en DQO en los humedales con vegetación y con aireación, con carga orgánica máxima de 200 g DQO/m²-d, y densidad de potencia de 55,48 mW/m². Los rendimientos conseguidos en remoción de materia orgánica son la mayor ventaja de esta nueva tecnología considerando la carga orgánica utilizada, lograda al utilizar portadores de crecimiento bacteriano de alta superficie específica (320 m²/m³) como medio de soporte del humedal artificial. En términos energéticos los valores de densidad de potencia son bajos, sin embargo, al ser una tecnología en desarrollo, mejoras en la arquitectura de la CCM deben ser implementados para aumentar su desempeño.

* Trabajo de Investigación de Maestría en Ingeniería Civil.

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Maestría en Ingeniería Civil. Director: Ph.D Otoniel Sanabria Artúnduaga, Co-director: MSc. Mario García Solano.

ABSTRACT

TÍTULO: TECHNICAL VIABILITY OF THE MICROBIAL FUEL CELL-HIGH RATE CONSTRUCTED WETLAND SYSTEM FOR WASTEWATER TREATMENT OF HIGH ORGANIC LOAD AND ELECTRICAL GENERATION.*

Author: Angélica Corzo Hernández**

Keywords: Microbial fuel cell, artificial wetlands, efficiency, redox potential, power density.

A new technology integrating high rate artificial wetland and microbial fuel cell (CCM-HAAT) has been established. It is based on the synergy and common requirements for the functioning of each one, among which the oxidation-reduction potential stands out. In artificial wetland exist a redox gradient in the water column allows aerobic zones near the surface, and anaerobic in the background. In CCMs, electrogenic bacteria oxidize organic substrates and transfer electrons to an electrical circuit to produce energy, using the redox gradient between electrodes. The combination of these two technologies can allow simultaneously the purification of wastewater of high organic load and energy generation. By the above mentioned reasons, the main objective in this investigation is to determine its technical viability. An exploratory study was performed, using an experimental system composed by of three lines of HAAT integrated with CCMs. Two lines were planted with *Cyperus alternifolius*, and the rest remained without vegetation acting as a control. The system was fed with synthetic wastewater, with loads of 100 and 200 gr COD/m²-d, in two phases (with and without supplemental oxygen). Efficiency of removal of 65% COD in wetlands with vegetation and aeration, with a maximum organic load of 200 g COD/m²-d, and power density of 55.48 mW/m², correspond to the conditions of better performance of the system. The yields obtained in the removal of organic matter are the greatest advantage of this new technology considering the organic load used, when using carriers of bacterial growth of high surface area (320 m²/m³) as support media of the artificial wetland. In energy terms, power density values are low, however, as this is a technology under development, improvements in the architecture of the CCM must be implemented to increase its performance.

* Master Thesis

** Faculty of Physical-mechanical Engineering. Civil Engineering Department. Master of Science in Civil Engineering. Advisor: Ph.D Otoniel Sanabria Artúnduaga, Co-Advisor: MSc. Mario García Solano.

INTRODUCCIÓN

La producción anual de aguas residuales procedentes de la industria agroalimentaria en Colombia sigue en aumento (DANE, 2014), y su vertido con poco o nulo tratamiento en el recurso hídrico es una de las causas de mayor impacto en el estado ambiental del agua en el país. Las estrategias para su gestión incluyen el pago de tasas retributivas y el establecimiento de normativas más exigentes que promueven la implementación de sistemas de tratamiento *in situ*.

El costo de la tecnología para tratamiento de aguas residuales es alto, por lo cual es pertinente la búsqueda de soluciones alternativas para depuración de estos vertidos altamente contaminantes. Las alternativas de bajo costo son una opción desde el punto de vista técnico, ambiental y económico para solventar esta necesidad.

Los humedales construidos o artificiales se encuentran entre estas opciones sostenibles, al poseer las ventajas de ser autosuficientes técnicamente, ecológicamente balanceados, y económicamente viables en comparación con los sistemas tradicionales de depuración de aguas residuales (Chittoor y Kumar, 2013). Aspectos que los han llevado a ser implementados para el tratamiento de diversos tipos de aguas residuales. A pesar de ello, los humedales presentan inconvenientes que pueden limitar su aplicación y estabilidad a largo término, tales como la colmatación del sustrato cuando son usados para tratamiento de altas cargas orgánicas (Liu *et al*, 2015), y la necesidad de grandes extensiones de terreno para su implementación.

Soluciones para remediar el proceso de colmatación y depurar aguas residuales con alta carga orgánica han llevado a proponer medios de soporte que brindan alta porosidad al lecho, y una capacidad de acumulación de sólidos netamente superior a los medios de soporte tradicionales, para ser el elemento principal de una

tecnología mejorada denominada Humedales Artificiales de Alta Tasa (Sanabria, 2006).

Por otra parte, la conciencia ambiental se ha incrementado considerablemente en las últimas décadas. Existe la necesidad de reducir la contaminación ambiental y la dependencia de los combustibles fósiles, y en el caso del tratamiento de aguas residuales es factible conseguir los dos objetivos, teniendo en cuenta que las bacterias presentes en los tratamientos biológicos pueden ser utilizadas para generar electricidad (Buitrón y Pérez, 2011). Es interesante y oportuno, entonces, llevar a cabo la degradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales por una parte y, por otra, generar electricidad utilizando la materia orgánica como fuente de energía. El propósito de esta combinación es ver el tratamiento del agua no sólo como algo necesario para la sustentabilidad, sino también como un proceso que valoriza la materia orgánica presente. Bajo condiciones adecuadas de desarrollo tecnológico, este tipo de proceso podría no solamente ser utilizado a gran escala para tratar aguas residuales de una ciudad o industria, sino también sería factible para ser instalado en pequeñas comunidades habitacionales o incluso en comunidades dispersas o aisladas del país.

Las células de combustible microbianas son una tecnología emergente que está obteniendo gran atención entre los investigadores a nivel mundial debido al potencial que poseen para generar bioelectricidad durante el tratamiento simultáneo del agua residual (Gude, 2016).

En la naturaleza existen diversos procesos donde las condiciones redox prevalecen como elemento necesario para su funcionamiento, tales como los humedales naturales. Los humedales artificiales son la réplica de los humedales naturales, y cuentan con diferentes zonas, tanto aeróbicas y anaeróbicas en toda la columna de agua (Ding *et al.*, 2014). Estas condiciones pueden ser utilizadas para el desarrollo de células de combustible microbianas, las cuales también funcionan mediante

diferencias de potencial redox. Esta similitud es la base de esta investigación en la que se ha determinado la viabilidad técnica de un sistema combinado CCM-HAAT, para tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica y generación de energía, mediante la construcción y monitoreo de un modelo experimental del sistema en mención, analizando la influencia de la vegetación en la eliminación de materia orgánica y la generación eléctrica.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El déficit energético y la contaminación ambiental son los dos cambios más severos a los que se enfrenta la humanidad (Fang *et al.*, 2013). Actualmente, la demanda de energía es provista principalmente mediante combustibles fósiles, los cuales adicionan dióxido de carbono en la atmósfera, repercutiendo en el cambio climático del planeta (Pandey, Bajpai, y Singh, 2016).

La gestión del agua es uno de los desafíos que impone el cambio climático. Tal como establece la Organización de Naciones Unidas - Agua (2012), este recurso natural es el principal medio a través del cual el cambio climático influye en el ecosistema de la tierra y por lo tanto en el sustento y el bienestar de las sociedades. Los cambios en las precipitaciones, y las temperaturas promedio más altas, afectarán la disponibilidad de los recursos hídricos a través de cambios en la forma, frecuencia, intensidad y distribución de las precipitaciones, la humedad del suelo, el deshielo de los glaciares, las corrientes fluviales y subterráneas, y conducirá a un mayor deterioro de la calidad del agua. Cada vez hay más evidencia de que esto ya está sucediendo en muchas regiones, y se espera que hacia el año 2050, dos tercios de la población mundial estén afectados por estrés hídrico (Misra, 2014).

El agua tiene el rol de causa y efecto del cambio climático a través de su ciclo integral. Este ciclo integral consta de varias etapas (captación, transporte, potabilización, distribución, consumo, evacuación y depuración) en las que la intervención humana no es la adecuada en muchos casos. En la captación, el curso del agua es desviado provocando alteraciones climatológicas que pueden desembocar en desertización o inundaciones. El transporte, la distribución y la evacuación, afectan el ciclo principalmente por las pérdidas del recurso en las redes de conducción. El consumo excesivo implica que una gran parte del recurso es derrochada en operaciones cotidianas (hasta 65% del consumo total en los hogares), implicando un agotamiento del agua de los ríos. El vertido de agua con

inadecuada depuración en ríos y arroyos, genera la degradación del agua dulce por exceso de nutrientes, salinidad y sedimentos, haciendo que sus características físicas sean distintas y su grado de evaporación sea diferente, generando eutrofización y disminución de la capacidad autodepurativa del recurso (Ruíz, Ramos, y Sánchez, 2009).

La adaptación al cambio climático es una necesidad, que inicia con reconocer esta realidad y actuar en consecuencia para lograr un desarrollo sostenible, sobre la base de prácticas de gestión del agua, con estrategias de aplicación de tecnologías innovadoras en los niveles adecuados tanto para la adaptación como para la mitigación. Múltiples estrategias se han planteado a nivel mundial para ayudar a la mitigación del cambio climático desde el punto de vista del ciclo integral del agua, siendo la tendencia más prometedora la reutilización de aguas residuales. Durante las últimas tres décadas se han llevado a cabo diversas investigaciones que van desde sus aplicaciones y ventajas, tecnologías de tratamiento y operación, aspectos económicos de la reutilización del agua, sus impactos sobre el medio ambiente, la salud pública y la seguridad alimentaria, así como las reacciones sociales de los usuarios finales (Tram VO *et al*, 2014).

La depuración del agua, paso previo a la reutilización, debe adoptar tecnologías sostenibles para reducir la generación de gases de efecto invernadero a través de la adecuada selección del proceso de tratamiento, la optimización de procesos y su manejo. La biotecnología, como herramienta de desarrollo, se explora constantemente para el bienestar de los ecosistemas, la transformación de contaminantes, generación de materiales biodegradables, búsqueda de fuentes de energía alternativas, entre otros, proporcionando un nuevo enfoque a la investigación para el desarrollo sostenible (Pandey *et al.*, 2016).

Los humedales artificiales, como biotecnología sostenible para depuración de aguas residuales, se presentan como instrumento para la mitigación del cambio climático,

debido a los altos rendimientos de eliminación de los contaminantes presentes en el agua, ofreciendo efluentes que pueden ser vertidos a las fuentes hídricas, generando menores emisiones de metano bajo ciertos parámetros de diseño en comparación con otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales (Mander *et al.*, 2014) tales como fangos activados, lagunas anaeróbicas, entre otras.

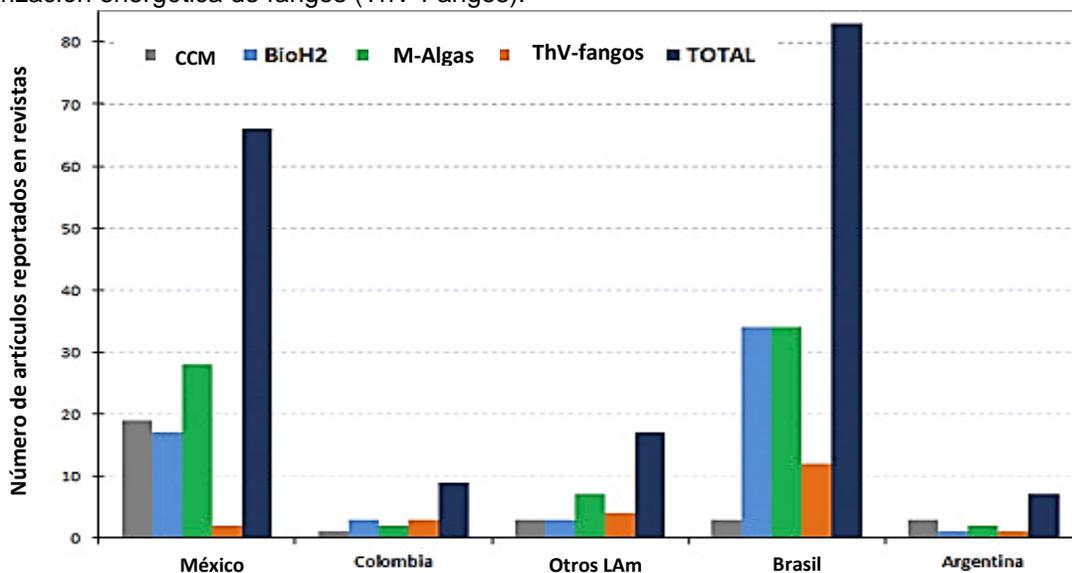
Dada las condiciones de diseño y operación de los humedales artificiales, en especial el gran área requerida para su implementación (5-10 m²/persona equivalente) y el problema de colmatación progresiva del medio granular, un gran número de investigaciones se han realizado en las últimas décadas, buscando no solo entender los procesos responsables del tratamiento, sino mejorarlos a través de una gran variedad de diseños y configuraciones, tales como humedales con aireación, configuración con baffles en su interior, combinaciones de varios tipos de humedales, entre otros (Wu *et al.*, 2014). En Colombia, se ha desarrollado un medio de soporte para reemplazar la tradicional grava utilizada como material de relleno en humedales artificiales de flujo subsuperficial, aumentando tanto la porosidad del medio (90-94%), así como la superficie específica para formación de biopelícula (320 m²/m³) permitiendo una reducción importante del área requerida por el humedal (0,5-1 m²) y el aumento de su vida útil sin presencia de colmatación, dando lugar a un nuevo tipo dentro de esta tecnología, denominado Humedal Artificial de Alta Tasa (HAAT) debido a que permite depurar altos volúmenes de aguas residuales en menor superficie de terreno. El sistema HAAT es una tecnología reciente, que ha sido implementado en estaciones depuradoras de aguas residuales domésticas, logrando los estándares de vertido conforme a las normas vigentes colombianas.

A nivel mundial, los sistemas de tratamiento de aguas residuales están cada vez más encausados a proveer remediación ambiental en simultáneo con la producción de energía. El potencial energético de las aguas residuales está representado en sus constituyentes, en especial en los contaminantes orgánicos, los cuales se han

convertido en la forma de energía más accesible en los sistemas de tratamiento de tipo biológico (Meneses-Jácome *et al.*, 2016).

Con las necesidades exponencialmente crecientes de energía y siendo los combustibles fósiles un recurso no renovable, se retoman conceptos de la bioelectroquímica y se proponen las células o pilas de combustible microbianas (CCM) como tecnología prometedora para resolver esta problemática. La investigación mundial, en el periodo 2004-2014, sobre tecnologías para tratamiento de aguas y recuperación de energía simultáneamente, representa el 6,07% de las publicaciones científicas en el campo del tratamiento de aguas, donde Latinoamérica contribuye con el 0,42%, siendo la investigación en CCM escasa en los países latinoamericanos, confirmando la necesidad de investigación en este campo (Meneses-Jácome *et al.*, 2016). En el grupo de países latinoamericanos, Colombia ha realizado poca investigación en el área (ver Figura 1), siendo México el pionero en este campo tecnológico.

Figura 1. Investigación en tópicos de tecnologías de recuperación de energía a través de sistemas de tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica. Celdas de combustible microbianas (CCM), procesos biológicos de producción de hidrógeno (BioH₂), procesos con micro algas (M-Algas), y valorización energética de fangos (ThV-Fangos).



Fuente: Adaptado de Meneses-Jácome *et al.*, 2016.

Las CCMs producen electricidad a partir de la oxidación anaeróbica de sustratos orgánicos biodegradables, gracias a la acción de microorganismos capaces de convertir una amplia variedad de compuestos orgánicos en CO₂, agua y energía. Dentro de los diversos tipos de aguas residuales, los efluentes de las industrias agroalimentarias son los más apropiados para ser depurados y a su vez producir energía, debido a su elevada concentración de materia orgánica. En Latinoamérica, se observa un crecimiento sostenido en la industria alimentaria (Kline *et al.*, 2008; FAO, 2013; Meneses-Jácome *et al.*, 2016), generando presión ambiental por el incremento de los efluentes contaminados que son vertidos a los cuerpos de agua (Díaz-Chávez *et al.*, 2011; Meneses-Jácome *et al.*, 2016), reforzando la posibilidad del uso de las CCMs ligadas a sistemas de tratamiento de aguas residuales, tales como los humedales artificiales (CW siglas en inglés).

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial presentan condiciones de óxido-reducción que varían según la profundidad de la lámina de agua (Ding *et al.*, 2014), ambiente propicio para una CCM, debido a su necesidad de diferencias de potencial para producir la energía. La combinación CW-CCM ha sido registrada en revistas científicas desde el año 2012, con cerca de 20 artículos publicados a la fecha, en los cuales se ha demostrado su buen desempeño en remoción de contaminantes, y cierta generación de bioenergía. Sin embargo, es necesaria su investigación, buscando optimizar materiales, dimensionamiento, y por supuesto aumentar la producción energética (Wu *et al.*, 2014; Doherty *et al.*, 2015).

Actualmente, no hay resultados de investigación disponibles que informen sobre la integración de humedales tipo HAAT y células de combustible microbianas para el tratamiento de aguas residuales y generación de electricidad. En este contexto, desarrollar un sistema combinado CCM-HAAT es una alternativa prometedora, para depuración de aguas residuales de alta carga orgánica, como las generadas en las industrias agroalimentarias, con el beneficio concomitante de producción de energía.

Los HAAT son una tecnología en desarrollo en los que diversos aspectos se encuentran aún en investigación. La viabilidad técnica de su unión con una CCM, solo es posible de determinar a partir de un estudio experimental, en el que sea medible la capacidad del sistema para producir energía y depurar aguas residuales, estableciendo un umbral de cargas orgánicas susceptibles de tratamiento en el sistema planteado. Así mismo, es importante entender cómo impactan al sistema CCM-HAAT, aspectos de funcionamiento que afectan tanto a los humedales como a las CCM independientemente, en especial la influencia del potencial de óxido-reducción y la vegetación. Es necesario comprender en la fase exploratoria las afectaciones que puede tener el sistema combinado, de manera que sea posible plantear el mejor escenario para su implementación.

2 OBJETIVOS

2.1 GENERAL

Evaluar la viabilidad técnica de un sistema CCM-HAAT (Celda de combustible microbiana- humedal artificial de alta tasa) para depuración de aguas residuales de alta carga orgánica y producción de energía.

2.2 ESPECÍFICOS

- Determinar la capacidad de eliminación de materia orgánica y la producción de electricidad en un modelo experimental CCM-HAAT, tratando agua residual sintética de alta carga orgánica.
- Establecer la influencia de la variación de la carga orgánica aplicada en la eficiencia de remoción de materia orgánica y la producción de electricidad.
- Evaluar el efecto de tres especies de macrofita en el ambiente redox, y su relación con la eliminación de materia orgánica y la producción de energía eléctrica, en el modelo experimental CCM-HAAT.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

3.1.1 Tipologías.

La depuración de aguas residuales es un proceso secuencial realizado en instalaciones diseñadas para eliminar mediante procedimientos físicos, químicos y biológicos, diversos tipos de contaminantes presentes en las aguas residuales, generando un efluente que por sus características de calidad puede ser retornado al medio ambiente. Una estación depuradora incluye generalmente tres etapas: pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario.

En el pretratamiento se retiran sólidos gruesos, grasas y aceites, arenas, y se realiza la homogeneización del caudal que entra a la instalación. Esta etapa es necesaria para garantizar el buen desempeño de los procesos posteriores en el sistema de tratamiento. Con el tratamiento primario, se separan los sólidos en suspensión del agua residual, disminuyendo en cerca de un 30% la concentración de materia orgánica presente en el afluente.

En el tratamiento secundario, se lleva a cabo la eliminación de contaminantes tales como materia orgánica, nitrógeno, fósforo, y microorganismos, entre otros, dependiendo del tipo de infraestructura implementada. Existen diversos tipos de tratamiento secundario, entre los que se encuentran los convencionales y los naturales. Los primeros, utilizan reactores operados con energía para realizar el proceso de depuración. En los naturales, o también denominados de bajo costo, blandos o no convencionales, se logra la reducción de la carga contaminante mediante reactores que operan metabólicamente en forma más lenta, sin aporte energético externo. Los tratamientos de bajo costo son ampliamente utilizados para el saneamiento en poblaciones de menos de 2000 habitantes, dado que implican un

ahorro respecto a los métodos tradicionales ya sea desde el punto de vista económico, energético o ambiental.

Los humedales construidos o artificiales, como tratamiento secundario de tipo no convencional, son sistemas diseñados y construidos para utilizar los mismos procesos que ocurren en humedales naturales, pero dentro de un ambiente más controlado, involucrando vegetación, suelos y comunidades microbianas asociadas para colaborar en el tratamiento de aguas residuales. De acuerdo a la hidrología del humedal se dividen en flujo superficial y subsuperficial (Vymazal, 2010).

Los humedales de flujo subsuperficial consisten de una comunidad de macrofitas emergentes plantadas en un medio poroso (generalmente grava o arena), a través del cual se hace pasar a las aguas residuales para su purificación. Según el flujo de disposición del agua residual, puede ser de flujo sumergido horizontal o flujo vertical (Nivala *et al.* 2012).

Los humedales artificiales con flujo subsuperficial se han utilizado para el tratamiento de aguas residuales por más de 50 años (Wu *et al.*, 2015), siendo diseñados para tratar especialmente aguas residuales domésticas o municipales. Hoy en día, los HCFSS se enfocan no solo en los contaminantes comunes, sino también en contaminantes especiales, tales como productos farmacéuticos, químicos, etc., por lo que se utilizan para el tratamiento de diversos tipos de aguas residuales. Las aplicaciones industriales incluyen las aguas residuales de las refinerías de petróleo, fábricas de productos químicos, producción de pulpa y papel, industrias de curtiembres y textiles, mataderos, destilerías e industrias vinícolas.

En particular, el uso de esta tipología de humedales está incrementándose para el tratamiento de aguas residuales del procesamiento de alimentos (e.g., la producción y transformación de la leche, el queso, el azúcar). Igualmente, se utilizan con éxito para tratar las aguas residuales procedentes de la ganadería (e.g., el cerdo y las

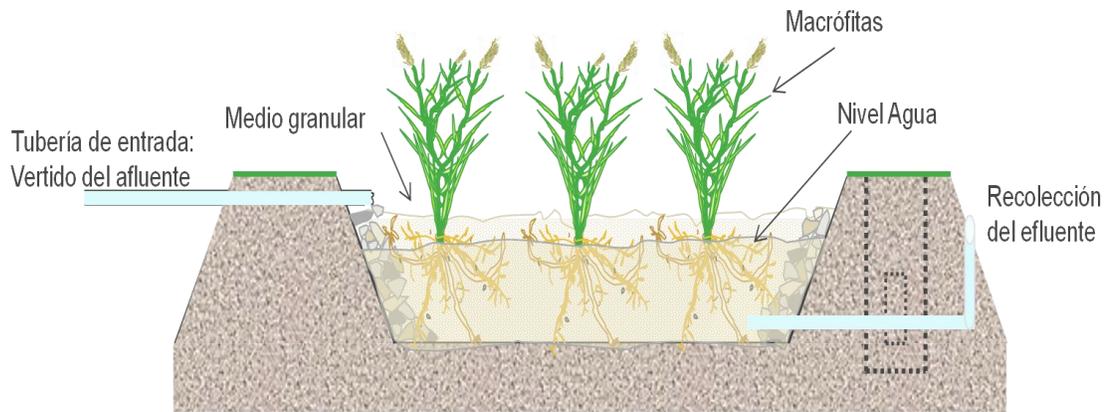
granjas lecheras), de diversas aguas de escorrentía, y lixiviados de vertedero (Vymazal, 2009; Wu *et al.*, 2015).

En los HCFSS horizontal (ver Figura 2, a), la depuración del agua residual se consigue por la interrelación de una variedad de procesos físicos, químicos, y, tales como sedimentación, filtración, precipitación, adsorción, absorción por la vegetación, y descomposición microbiana.(García *et al.* 2010; Kadlec y Wallace, 2008). Criterios generales de diseño establecen la profundidad de la lámina de agua en un intervalo de 0,3 a 0,9 m, distancia a la superficie de entre 0,05 y 0,1 m, área necesaria de 5 m²/persona equivalente, y carga orgánica alrededor de 6 g DBO₅/m²·d (García *et al.* 2005).

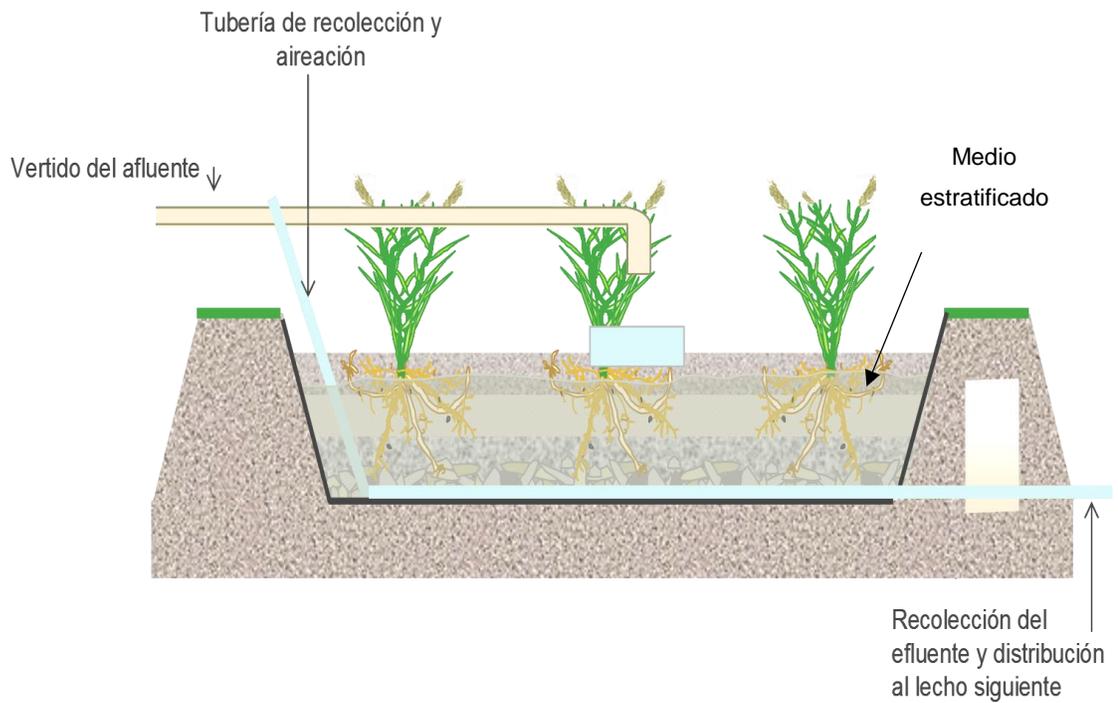
La tecnología de HCFSS de tipo vertical (ver Figura 2, b) fue desarrollada en Europa como alternativa a los humedales horizontales para producir efluentes nitrificados (Stefanakis y Tsihrintzis 2012). La circulación del agua es de tipo vertical y tiene lugar a pulsos, de manera que el medio de soporte no está permanentemente inundado. La profundidad del medio granular entre 0,5 y 0,8 m. Operan con cargas de alrededor de 20 g DBO₅/m²·d, en superficies de entre 1-3 m²/p.e (Zapater-Pereyra *et al.*, 2015). Los sistemas verticales tienen una mayor capacidad de tratamiento que los horizontales (requieren de menor superficie para tratar una determinada carga orgánica), por lo cual es común encontrarlos en combinación con humedales de tipo horizontal para que sucedan de forma progresiva los procesos de nitrificación y desnitrificación, y se consiga así eliminar nitrógeno.

La configuración estructural de los humedales de flujo subsuperficial es similar para las tipologías de flujo horizontal y vertical. Se constituyen por los siguientes elementos: (1) estructuras de entrada del afluente, (2) impermeabilización, (3) medio granular, (4) vegetación y (5) estructuras de salida. Adicionalmente los de tipo vertical suelen incluir tuberías de aireación. (Figura 2, b).

Figura 2. Humedal Construido de Flujo Subsuperficial: (a) Horizontal, (b) Vertical



(a)



(b)

Fuente: García y Corzo, 2008.

Estructura de entrada: La importancia de este elemento en los humedales construidos se evidencia en el funcionamiento hidráulico del sistema (Niu *et al.*, 2014). Un diseño adecuado del sistema de distribución del agua residual en el lecho evita la formación de flujos preferentes, así como la colmatación rápida de la zona de entrada. Los elementos más utilizados son tuberías perforadas y canales con vertederos en forma de “V”. Sin embargo, las tuberías perforadas se asientan sobre el terreno generando desniveles que provocan zonas con mayor descarga de agua. Por lo anterior se recomienda el uso de canales de distribución uniforme, cuyo mantenimiento es más sencillo (García y Corzo, 2008).

Medio de Soporte: El medio filtrante es uno de los tres elementos esenciales de un humedal construido (Saeed y Sun, 2012). Además de proveer soporte físico para el crecimiento de la vegetación y superficies para el desarrollo de la biopelícula, el medio promueve la sedimentación y filtración de contaminantes (Ming *et al.*, 2010). Dentro de los medios comúnmente utilizados se encuentran la grava y la arena, aunque se encuentran en auge la evaluación de medios alternativos como zeolita, perlita mineral expandida, vermiculita, piedra caliza, ceniza de carbón, escoria, y algunos subproductos industriales (Yalcuk y Ugurlu, 2009; Albuquerque *et al.*, 2010; Lu *et al.*, 2016), encontrando mejoras en el desempeño del humedal para la remoción de contaminantes orgánicos, sólidos en suspensión y fósforo.

La elección de los materiales de la matriz debe determinarse en función de sus características físicas y químicas (Lu *et al.*, 2016). Características físicas como distribución de tamaño de partícula, porosidad, tamaño de partícula efectivo y conductividad hidráulica (Pedescoll *et al.*, 2011); y propiedades químicas que son determinadas por las composiciones de los materiales como el desarrollo de una carga superficial debido a las propiedades ácido-base, son factores importantes que afectan el rendimiento del sistema.

La resistencia mecánica y química de los materiales que componen la matriz de soporte es una característica fundamental, ya que este componente debe soportar las condiciones de operación (flujo y composición química de las aguas residuales) sin significativa degradación de sus principales propiedades (Pedescoll *et al.*, 2011). Además, no debe liberar sustancias que pueden ser una fuente de toxicidad para los componentes bióticos o que puede en última instancia, contaminar el agua residual tratada.

Dado que el flujo del líquido a través del lecho del humedal depende del gradiente hidráulico, de la conductividad hidráulica, del tamaño y porosidad del material, como regla general un desempeño satisfactorio requiere una conductividad hidráulica de aproximadamente 10^{-3} - 10^{-4} m/s, porosidad de 30-45%, tamaño del material entre 0 y 30 mm (Dordio y Carvalho, 2013).

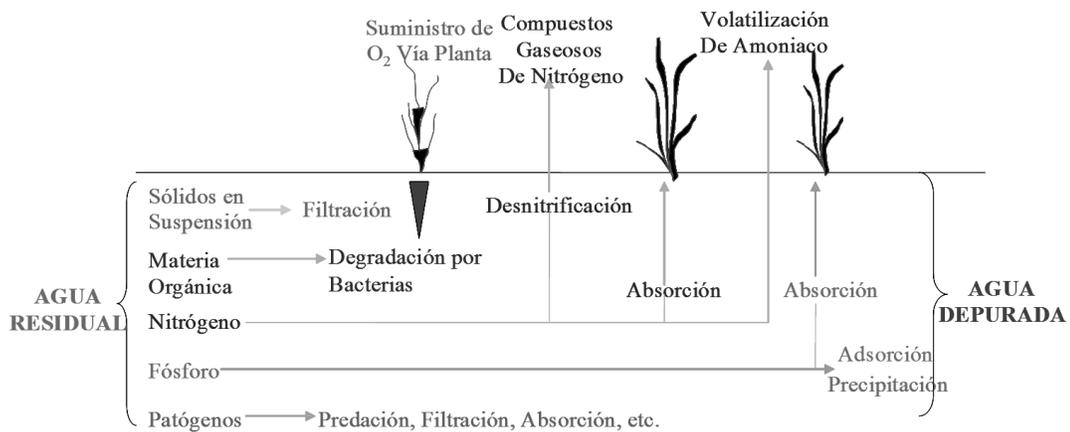
Vegetación: Las macrofitas son un componente esencial de los humedales construidos, su selección es un factor clave en el diseño del humedal (Leto *et al.*, 2013; Türker *et al.*, 2016). Este tipo de vegetación presenta adaptaciones especiales para vivir en ambientes permanentemente inundados. Sus tejidos internos disponen de espacios vacíos que permiten el flujo de gases desde las partes aéreas hasta las subterráneas, y sus rizomas tienen una gran capacidad colonizadora que favorece el desarrollo de biopelícula en su superficie. Diversos estudios muestran un efecto significativo y positivo de este tipo de vegetación en la remoción de contaminantes (Mequita *et al.*, 2013; Leto *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2014), debido a que proporcionan una gran área superficial para el crecimiento microbiano, y el suministro reducido de carbono y oxígeno en la rizosfera. Además de otras ventajas tales como su contribución a reducir la velocidad del agua residual, estabilizan la superficie del lecho, aíslan la superficie de las heladas en invierno, y lo más importante asimilan nutrientes (0,5 a 40% de NT, Saeed y Sun, 2012).

Las especies más utilizadas en humedales construidos son el carrizo (*Phragmites australis*), la espadaña (*Typha*) o los juncos (*Scirpus*). En muchos países, y especialmente en los trópicos y subtropicos, se utilizan plantas locales, incluyendo especies ornamentales (Vymazal, 2011).

3.1.2 Procesos de eliminación de contaminantes.

El tratamiento de aguas residuales en humedales construidos de flujo subsuperficial se consigue a través de la combinación de procesos físicos, químicos y biológicos (ver Figura 3), que suceden simultáneamente por la interacción del agua residual con el medio poroso, la atmósfera, la vegetación y las comunidades microbianas que asimilan los constituyentes del afluente (Sun et al., 2016; Kadlec y Wallace, 2008).

Figura 3. Procesos de Depuración de Aguas Residuales Urbanas



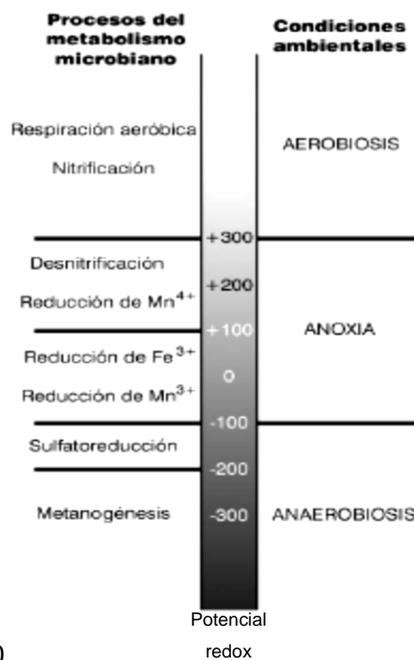
Fuente: García y Corzo, 2008.

Los sólidos en suspensión son removidos por dos procesos principalmente, la filtración y la sedimentación. La filtración se produce por el atrapamiento de las partículas dentro de la zona radicular de las plantas o en la zona intersticial del material granular a medida que el agua pasa a través del humedal.

La sedimentación es promovida por las bajas velocidades de circulación del fluido (Kadlec y Wallace, 2008). La eficiencia de remoción de este contaminante puede llegar a ser del orden del 85-95% (García y Corzo, 2008).

La materia orgánica en aguas residuales se encuentra en forma disuelta o particulada. En forma disuelta se difunde dentro de la biopelícula, y dependiendo de la disponibilidad de oxígeno, es degradada por vía aeróbica, anóxica o anaeróbica (Liu *et al.*, 2016). La materia orgánica particulada de tipo biodegradable, es solubilizada y convertida en compuestos solubles, para seguir las mismas vías de descomposición de la materia orgánica disuelta. La ruta bioquímica de remoción que se siga en un humedal depende principalmente de las condiciones redox (ver Figura 4) en su interior (García *et al.*, 2010).

Figura 4. Procesos metabólicos de humedales construidos en escala de potencial redox.



Fuente: Pedescoll, 2010.

El potencial redox (Eh) indica el carácter oxidante o reductor de un medio (agua, suelo), relacionado indirectamente con la concentración de oxígeno disponible para

llevar a cabo diversas reacciones. Potenciales redox positivos indican mayor concentración de oxígeno, y por tanto condiciones oxidantes; así como valores negativos de Eh, indican que las condiciones del medio son reductoras.

En humedales artificiales, dentro del lecho, macro y micro gradientes de condiciones redox favorecen el desarrollo de comunidades microbianas diversas capaces de generar diferentes reacciones redox. Particularmente, la rizosfera es de gran importancia para la remoción de contaminantes debido a la liberación de oxígeno y carbono orgánico de las raíces de las plantas dentro del ambiente circundante. En la rizosfera varias transformaciones microbiológicas, tales como la mineralización del carbono orgánico, la nitrificación, la desnitrificación, la sulfatorreducción, y la re-oxidación y reducción de compuestos sulfurados ocurren simultáneamente en una pequeña escala espacial. Esta combinación y proximidad de diferentes procesos redox es de importancia para la efectividad de remoción total, y es la ventaja clave del tratamiento del agua residual en humedales (Wu *et al.*, 2013).

En humedales de flujo subsuperficial horizontal, el oxígeno es transferido desde la atmósfera por difusión o aportado por la vegetación, con tasas insignificantes (0,3-3 g O₂/m²-d) en comparación con la demanda de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica de las aguas residuales urbanas (García *et al.*, 2010; Tyroller *et al.*, 2010), en contraste a los humedales de tipo vertical en los que la presencia de oxígeno es abundante en todo el lecho. De esta manera, en HCFSS horizontal los procesos de remoción de materia orgánica siguen en mayor medida las rutas anaeróbicas de descomposición, algunas de ellas ligadas a la degradación de otros contaminantes tales como el hierro, sulfato, nitrato, entre otros.

La descomposición anaeróbica de la materia orgánica es un proceso de dos fases desarrollado por bacterias heterótrofas anaeróbicas. En la primera fase, las bacterias formadoras de ácidos convierten la materia orgánica en nuevas células, ácidos orgánicos, y alcoholes.

En la segunda etapa, las bacterias formadoras de metano continúan la oxidación (metanogénesis), transformando los compuestos orgánicos en nuevas células bacterianas, metano y dióxido de carbono (Saeed y Sun, 2012). Cuando el sulfato es un constituyente del afluente, la descomposición de la materia orgánica puede seguir la ruta denominada sulfato reducción, en la cual este compuesto puede ser usado como aceptor de electrones en ausencia de oxígeno, utilizando los productos de la fermentación. El rendimiento de eliminación de la materia orgánica en sistemas de humedales oscila entre 75-95% (García y Corzo, 2008).

La eliminación del nitrógeno en HCFSS puede ser llevada a cabo por rutas biológicas, tales como la amonificación, nitrificación, desnitrificación, asimilación por la vegetación, procesos anammox, ó mediante rutas físico-químicas como la volatilización del amonio y la adsorción. Si el agua residual afluente contiene nitrógeno en forma orgánica, se inicia su eliminación con la amonificación. En este proceso los aminoácidos son transformados en amonio (NH_3). La velocidad de conversión en la amonificación es rápida en las zonas de los humedales donde prevalecen condiciones aeróbicas, y es lenta en las zonas donde las condiciones son anaeróbicas.

La nitrificación es el paso siguiente en la descomposición aeróbica del nitrógeno orgánico. En esta etapa el amonio es transformado a nitrito por las bacterias *Nitrosomonas*, y posteriormente es convertido a nitrato por las bacterias *Nitrobacter* (Saeed y Sun, 2012). La reducción bioquímica anaeróbica de nitrato y nitrito a nitrógeno gas es conocida como desnitrificación. En HCFSS este proceso es posible debido a la unión de los ciclos del carbono y el nitrógeno, permitiendo que las bacterias desnitrificantes obtengan energía a partir de compuestos orgánicos, simultáneamente con el uso del nitrato como aceptor de electrones (García *et al.*, 2010).

Otro proceso que cobra importancia en HCFSS es la oxidación anaeróbica del amonio (Proceso anammox), en el cual el amonio mediante oxidación directa es transformado a nitrógeno gas. Comparado con los procesos de nitrificación y desnitrificación presenta las ventajas de no requerir una fuente externa de carbono, menor demanda de oxígeno, y menor consumo energético; sin embargo para ser optimizado necesita condiciones tales como pH en el rango de 6,7-8,3, y temperatura entre 30-37°C. Aunque se presenten diversas rutas para la eliminación del nitrógeno en HCFSS, la principal vía de remoción de este contaminante es la nitrificación-desnitrificación, con tasas que aproximadamente alcanzan el 50% de tratamiento del nitrógeno total (Saeed y Sun, 2012).

Los mecanismos de eliminación del fósforo incluyen la adsorción al material de relleno del humedal, y la precipitación química mediante combinación con hierro, aluminio y calcio. Debido al desarrollo de la biopelícula y las condiciones de operación del humedal, la eficiencia de remoción del fosforo por adsorción es baja (Arias y Brix, 2005).

3.2 HUMEDALES ARTIFICIALES DE ALTA TASA

Los efluentes de diversas industrias poseen características específicas, tales como flujo y cargas variables, acidificación, alto contenido de materia orgánica (ver Tabla 1), sólidos, nitrógeno, fósforo, aceites y grasas, entre otros, que hacen que su depuración en humedales convencionales sea difícil y se presenten serias limitaciones en su tratamiento (Wu *et al.*, 2015).

Los humedales artificiales para depuración de altas cargas orgánicas se implementan como tratamiento secundario o terciario, posterior a tratamientos primarios convencionales de fangos activados (Calheiros *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2015). En algunos casos, cuando el volumen del efluente industrial es pequeño, los humedales reciben directamente estas aguas residuales con alta concentración de

materia orgánica, generando efectos negativos no solo en el comportamiento hidráulico y en la eficiencia del sistema, sino en la salud y crecimiento de la vegetación (Kadlec *et al.*, 1997; Zingelva y Wooldridge, 2009;. Wu *et al.*, 2015).

Tabla 1. Concentraciones comparativas de aguas residuales industriales

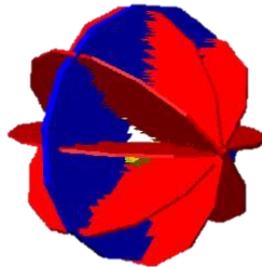
Tipo de industria	DBO ₅ mg/l	DQO mg/l	SST mg/l	pH
Matadero (aves de corral)	500-3000	2000-5200	800-1800	6,0-8,5
Tabaco	760-4200	4500-11800	140-600	4,0-5,5
Extracción de almidón	2700	41000	23000	6,0-7,0
Molienda de azúcar	25000	50000	-	-
Crema de coco	8900	129000	2900	4,0-5,0
Destilería	1000-120000	3000-150000	180-3500	3,0-9,0
Cervecería	600-1650	1250-3600	150-500	4-12
Refrescos	600-2000	1410-3000	45-510	2-11
Pasta (Fideos)	410-1050	1000-2000	200	4-10
Cocinas industriales	300-800	770-1550	200-600	6,2-8,9
Procesamiento de vegetales	170-1800	-	80-890	-
Mariscos	400-3000	400-4900	350-1500	6,0-8,0
Lácteos	480-3400	920-4300	120-2000	3-12
Productos café	2000-9000	3000-12000	500-5100	4,0-7,4
Salsas	800-5000	1800-10000	130-800	3,0-6,5
Productos farmacéuticos	100-4000	150-8500	300-1500	6-7
Productos cuidado personal	250-12400	600-18500	30-600	3,5-7,5

Fuente: Adaptada de Ng, 2006.

Durante las últimas dos décadas, el desarrollo de investigación en la temática de los humedales se ha dirigido hacia la optimización del diseño, para conseguir su implementación masiva (Wu *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2016), proponiendo diferentes estrategias de operación (recirculación del efluente, aireación, operación intermitente, etc.), e innovadoras configuraciones (humedales de flujo en corredor circular, humedales híbridos, con baffles, etc.), así como el uso de sustratos alternativos a la grava para mejorar o aumentar el desarrollo de la biopelícula, que permita depurar aguas residuales con mayores cargas orgánicas. En este último aspecto, se han propuesto diversos materiales tales como los agregados de arcillas expandidas (Filtralita), zeolita, vermiculita, piedra caliza, ceniza de carbón, escoria, y algunos subproductos industriales (Yalcuk y Ugurlu, 2009; Albuquerque *et al.*, 2010; Lu *et al.*, 2016, Wu *et al.*, 2016).

En Colombia, desde el año 2006 se trabaja en el diseño e implementación de medios de soporte plástico de alta superficie específica, que sustituyan a la matriz tradicional en humedales construidos o artificiales de flujo subsuperficial, con el objetivo de permitir la depuración de altas cargas orgánicas en menor superficie de terreno, y a su vez prolongar la vida útil del humedal sin presencia de colmatación (Sanabria, 2006). En su primera versión, el medio de soporte denominado “Biosphere - Empaque con anillos ortogonales para la depuración de aguas residuales” (Patente Resolución SIC 64286/2010) (ver Figura 5), se integró dentro de un sistema de configuración simple y eficiente (sistema HUMEDAR-I®), conformado por un reactor anaerobio de compartimientos paralelos de flujo de pistón (RACFP), seguido de un humedal artificial de alta tasa, plantado con macrofitas nativas y comunes soportadas sobre el medio Biosphere (300 m²/m³ de superficie específica).

Figura 5. Medio de soporte plástico BIOSPHERE.



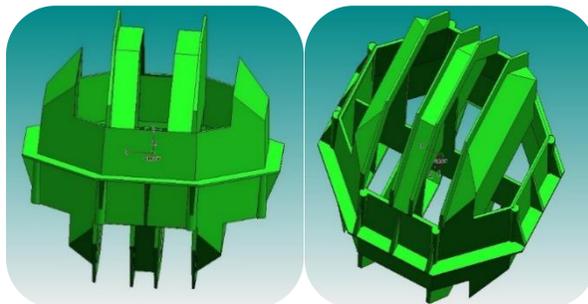
Fuente: Otálora, 2011.

El sistema HUMEDAR-I® se ha implementado en diversos lugares del país (Sanabria, 2006; Otálora, 2011), evidenciando ventajas en costos y eficiencias de remoción de contaminantes respecto a tratamientos biológicos similares, con valores de eficiencia de 92 a 95% en remoción de DBO₅ y SS, 74 a 79 % en nutrientes (N y P) y hasta cuatro órdenes de magnitud logarítmicas de coliformes en los sistemas a escala real con flujo continuo para un tiempo total de retención de 18 horas. El área efectiva utilizada corresponde al rango de 0,1 a 0,47 m²/hab-Equivalente dependiendo de la población atendida, lo que supone una disminución de por lo

menos un 90% o mayor, respecto de la demanda típica de terreno utilizada con sistemas convencionales de humedales artificiales (5 a 12 m²/hab-Equivalente), constituyéndose en una excelente alternativa para depurar las aguas residuales urbanas (Sanabria, 2006). Según Otálora (2011), específicamente en un HAAT, en una Planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, instalada en la locación petrolera Caño Gandul en el departamento de Casanare, la eficiencia de remoción de la DBO₅ alcanzó valores cercanos al 45%, y del 92,5% para SST, con un tiempo de retención hidráulico promedio de 2,77 d. El novedoso sistema no requiere mantenimiento rutinario ni continuo, no consume energía eléctrica, ni demanda personal especializado para su funcionamiento, además puede ser utilizado para depurar cargas orgánicas similares a las generadas en comunidades de hasta 5000 habitantes equivalentes, por cada unidad construida.

En su segunda versión, denominado Rootfill (Patente Resolución SIC 37697, junio 16 de 2016), se ha innovado con una nueva configuración geométrica del medio de soporte (ver Figura 6), estructurado con un reticulado de mayores superficies planas, aumentando su superficie específica (320 m²/m³), conservando su porosidad (94%). Su modificación permite el manejo de un espectro más amplio de cargas orgánicas en humedales artificiales de alta tasa. La aplicabilidad de Rootfill se encuentra actualmente en investigación para aguas residuales procedentes de las industrias agroalimentarias.

Figura 6. Medio de soporte plástico versión II “Rootfill”.



Fuente: Sanabria y Corzo, 2016.

3.3 CÉLULAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS

Las células, celdas o pilas de combustible microbianas (CCM) son una tecnología emergente para generación de energía a partir de residuos biogénicos (Venkata *et al.*, 2014; Vogl, Bischof y Wichern, 2016), cuya investigación se ha intensificado en los últimos años para conseguir su aplicación al tratamiento de aguas residuales, bioremediación, remoción de xenobióticos, recuperación de productos económicamente rentables tales como captura de CO₂, entre otros (Pandey *et al.*, 2016). En aguas residuales, las CCM ofrecen varias ventajas energéticas, económicas, ambientales, y operacionales, debido a que producen electricidad limpia directamente de la materia orgánica presente en el agua, sin necesidad de separación, purificación y conversión de los productos energéticos, en comparación con otros procesos como la digestión anaeróbica. Además, consumen únicamente un 10% de energía externa para su operación (alimentación y mezcla del reactor) comparado con la energía necesaria en un sistema de fangos activados convencional (Gude, 2016).

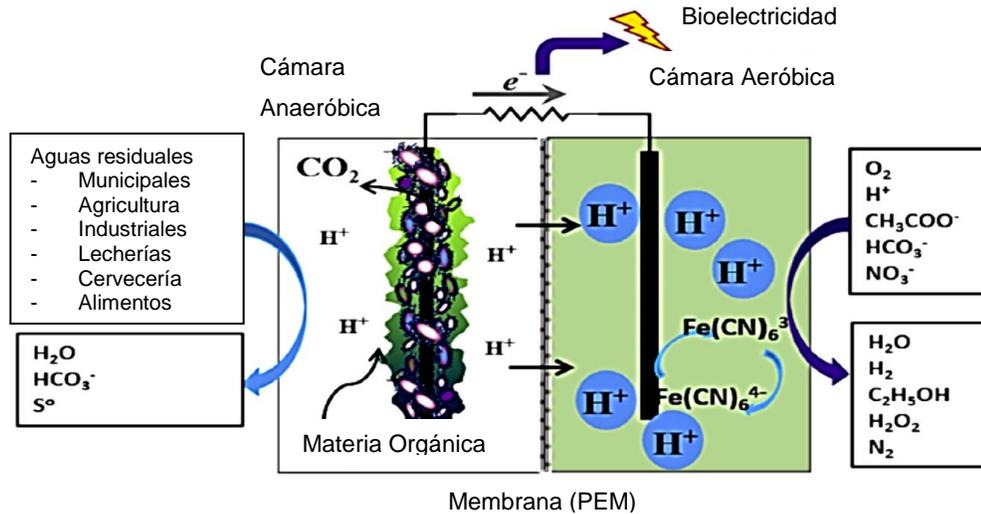
3.3.1 Principios de funcionamiento

Una CCM generalmente se compone de dos cámaras, una anaeróbica y otra aeróbica, en medio de las cuales se ubica un separador (ver Figura 7). La cámara anaeróbica contiene sustratos orgánicos que al oxidarse por acción de los microorganismos, generan electrones, protones y CO₂.

Cada una de las cámaras posee un electrodo, el ánodo se ubica en la cámara anaeróbica y el cátodo en la aeróbica. Cuando los electrones se liberan en la cámara anódica, son captados por el ánodo y posteriormente transferidos hacia el cátodo mediante un circuito externo. Simultáneamente, en la cámara anódica se generan protones que migran hacia la cámara catódica a través del separador,

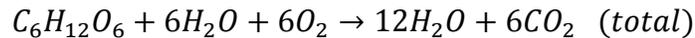
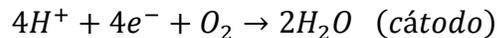
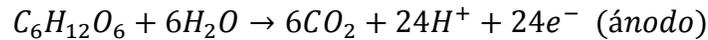
donde se combinan con el oxígeno del aire para reducirse a agua con los electrones que capta directamente el cátodo (Revelo, Hurtado y Ruíz., 2013).

Figura 7. Esquema de una CCM de dos cámaras.



Fuente: Adaptada de Gude, 2016.

La estequiometría del proceso, siendo la glucosa la principal fuente de carbono, se establece como:



La reacción total involucra el rompimiento del sustrato a dióxido de carbono y agua con una producción concomitante de electricidad como subproducto. La diferencia entre los potenciales positivo del cátodo y negativo del ánodo es considerada como el voltaje de la celda ó la fuerza electromotriz que motiva los electrones, dirigiéndolos del ánodo al cátodo.

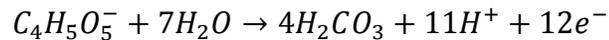
En aguas residuales, las sustancias orgánicas, otros nutrientes y metales pueden utilizarse para producir energía, gracias a las reacciones de oxidación-reducción que suceden en el ánodo y el cátodo (Gude, 2016), tales como:

- Reacciones de oxidación en el ánodo.

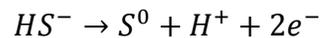
Glycerol:



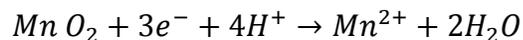
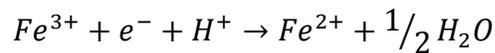
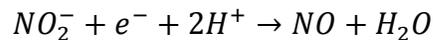
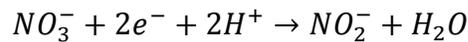
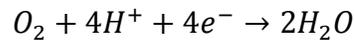
Malato:



Sulfuro:



- Reacciones de reducción en el cátodo.



Los potenciales de reducción y oxidación (E_{elec}) se determinan teóricamente mediante la ecuación de Nerst (Ecuación 1) (Logan *et al.*, 2006).

$$E_{elec} = E^o - \frac{RT}{nF} \ln(\pi) \quad (1)$$

Donde,

E_{elec} es el potencial corregido del electrodo.

E^o es el potencial del electrodo en condiciones estándar (Temperatura= 293 K, pH=7, p_{O_2} =0,2 bar).

R es la constante de los gases (8,31 J/mol K).

T es la temperatura en Kelvin.

F es la constante de Faraday (96485 C/mol).

n es el número de electrones intercambiados.

π es el cociente entre los coeficientes estequiométricos de los productos y de los reactivos.

Conocidos los potenciales entre el ánodo y el cátodo, la determinación del voltaje teórico de una CCM se efectúa mediante la ecuación 2. En la práctica, el potencial de reducción-oxidación en cada electrodo se mide a través de un electrodo de referencia.

$$E_{fem} = E_{cat} - E_{an} \quad (2)$$

En una celda bajo condiciones estándar, el potencial del cátodo, E_{cat} es de 0,805 V y el del ánodo puede ser tan bajo como $E_{an} = -0,331$ V, dependiendo del cultivo microbiano y del sustrato orgánico (Fricke *et al.*, 2008). Por lo tanto, considerando la ecuación 2, el potencial teórico máximo es 1,1 V. No obstante, se producen pérdidas que conducen a una reducción del potencial, siendo el máximo potencial real medido de 0,8 V (Logan *et al.*, 2006). Las pérdidas pueden ser de dos tipos: óhmicas y de sobrepotencial.

- Pérdidas óhmicas: Incluyen la resistencia al flujo de electrones a través de los electrodos y las interconexiones (Hoogers, 2003; Larminie y Dicks, 2000). Pueden ser reducidas minimizando el espacio entre electrodos o aumentando la conductividad de la solución al máximo tolerado por las bacterias.
- Sobrepotencial: Normalmente depende de la corriente y puede ser subdividida en:
 - Pérdidas por activación: Se producen durante la transferencia de electrones entre los compuestos de reacción (bacterias y oxígeno) y la superficie del electrodo. Se pueden reducir aumentando la superficie del electrodo, aumentando la temperatura de funcionamiento, o estableciendo una biopelícula enriquecida en el electrodo (Logan *et al.*, 2006).

- Pérdidas por metabolismo bacteriano: Para generar energía metabólica, las bacterias transportan los electrones desde el sustrato, con un bajo potencial, hasta el aceptor final de electrones, con un potencial alto. En una CCM, el ánodo es el aceptor final y su potencial determina la energía ganada por la bacteria. Cuanto más grande sea la diferencia de potenciales, más grande es la ganancia, pero menor es el voltaje conseguido por la CCM. Por lo tanto, para maximizar el voltaje de la CCM el potencial del ánodo ha de ser lo más bajo posible (negativo). No obstante, un potencial del ánodo demasiado bajo inhibe el transporte de electrones y la fermentación del sustrato pudiendo proporcionar más energía por los microorganismos (Logan *et al.*, 2006).
- Pérdidas por concentración o por transporte de masa: Se producen cuando la tasa de transporte de masa de una especie hacia o desde el electrodo limita la producción (Hoogers, 2003; Larminie y Dicks, 2000).

El potencial real de una celda microbiana se determina a partir de la diferencia entre el voltaje teórico (E_{emf}), y las pérdidas, debidas al sobrepotencial del ánodo y el cátodo (η_a y η_b respectivamente) y las pérdidas óhmicas (IR_Ω), tal como se relaciona en la ecuación 3:

$$E_{cell} = E_{emf} - (\sum \eta_a + |\sum \eta_b| + IR_\Omega) \quad (3)$$

3.3.2 Configuraciones de CCMs.

A través del desarrollo de las CCMs, varias configuraciones han sido probadas por diversos investigadores según la aplicación en la cual fuese empleada (Li y Qiao, 2013). Las principales configuraciones se detallan a continuación.

3.3.2.1 Cámara doble. Se estructura en dos cámara, una anaeróbica y otra aeróbica, conectadas por un tubo, el cual contiene un separador, que normalmente es una membrana de intercambio de cationes, o un puente salino (ver Figura 8, a). La membrana permite únicamente el paso de protones de la cámara anaeróbica a

la aeróbica (Ferreira Mercuri *et al.*, 2016). Los puentes salinos producen poca energía debido a la alta resistencia interna. La configuración de cámara doble es utilizada principalmente para investigación de parámetros básicos tales como el análisis de la producción de energía utilizando nuevos materiales, y los tipos de comunidades microbianas que actúan durante la degradación de compuestos específicos, debido a que producen densidades de energía bajas (Li y Qiao, 2013).

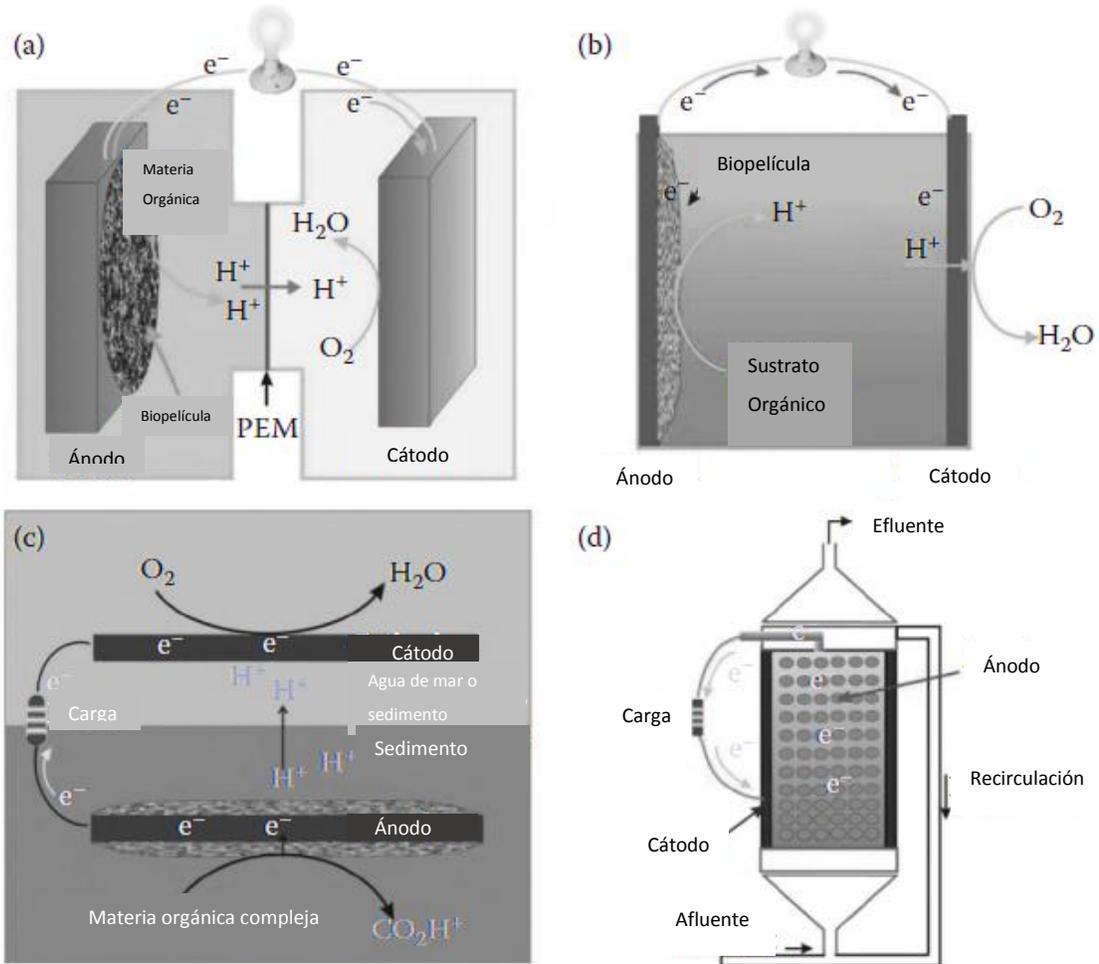
3.3.2.2 Cámara única. Como alternativa a la baja densidad de potencia conseguida por las CCM de doble cámara, se propusieron las CCMs de una sola cámara sin membrana de intercambio de protones, y con el cátodo al aire (Ver Figura 8, b). Esta tipología de celda de combustible microbiana ha sido utilizada por muchos grupos de investigación para generar electricidad a partir de aguas residuales y degradar o remover contaminantes específicos tales como colorantes y antibióticos (Li y Qiao, 2013).

3.3.2.3 De sedimento. En esta variante, el ánodo se encuentra enterrado bajo el sedimento, en ausencia de oxígeno, y el cátodo se ubica en la superficie sobre el sedimento, en contacto con el oxígeno atmosférico. Los electrones derivados de la respiración microbiana en los sedimentos son primero aceptados en el ánodo y luego transferidos a través del circuito externo al cátodo. La corriente anódica suele generarse por la oxidación del carbono orgánico sedimentario y los compuestos de azufre (Donovan *et al.*, 2011). Otro diseño, incluye la ubicación del ánodo en sedimento marino (ver Figura 8, c), y el cátodo en el agua de mar, de manera que se utilizan los gradientes redox que posee el agua marina rica en oxidantes, y el sedimento marino rico en reductores (Li y Qiao, 2013).

3.3.2.4 Tubular. En la configuración tubular de CCMs (ver Figura 8.d), su estructura está conformada por electrodos que se ubican verticalmente dentro de un reactor cilíndrico, operados con flujo ascendente. El ánodo se ubica en la zona inferior del

reactor, mientras que el cátodo se encuentra en la superficie, con o sin contacto con la atmósfera (Li y Qiao, 2013).

Figura 8. Configuraciones de Celdas de Combustible Microbianas



Fuente: Adaptada de Li y Qiao, 2013.

El diseño del reactor de una CCM es un aspecto importante que está directamente relacionado con las interacciones sustrato-microorganismos-electrodo que gobiernan la eficiencia y escalabilidad de una CCM. La configuración del reactor, los materiales del electrodo, y la inclusión o no de un separador, son los tres parámetros del diseño de CCMs que afectan significativamente las pérdidas de energía y las

reacciones bioelectroquímicas en el ánodo. Durante las últimas décadas la tendencia en investigación en CCMs se centra en determinar la óptima configuración para conseguir la mayor eficiencia de generación de energía mediante la minimización de la resistencia interna, concluyéndose que para ello la distancia entre electrodos debe ser pequeña, el área superficial de la membrana de intercambio debe ser grande, y los materiales de los electrodos deben contar con una alta conductividad, ser biocompatibles y con área superficial elevada (Li *et al.*, 2013; Gude, 2016; Sun *et al.*, 2016).

3.3.3 Depuración de aguas residuales industriales agroalimentarias en CCMs.

El agua residual de las industrias agroalimentarias contribuye fuertemente a la contaminación ambiental, debido a su composición con altos niveles de materia orgánica, y nutrientes. Su remediación antes de su descarga al medio ambiente es inexorable. Diversas tecnologías son factibles de uso para depurar aguas residuales, aunque alternativamente ha emergido la tendencia de utilizar células de combustible microbianas para depurar aguas residuales y generar electricidad (Lin *et al.*, 2014; Pandey *et al.*, 2016; Gude, 2016).

Los efluentes agroalimentarios son ricos en carbohidratos fácilmente biodegradables, en ácidos orgánicos, y con relativamente baja concentración de nitrógeno orgánico. Diversos estudios a escala laboratorio se han realizado para probar la capacidad de remoción de materia orgánica y la generación de energía (ver Tabla 2) utilizando este tipo de efluentes, demostrando su factibilidad. La posibilidad de producir energía a partir del agua utilizada para procesamiento de alimentos puede ser de hasta 260 kWh/ton de producto fabricado (Gude, 2016). Sin embargo, el desempeño de una CCM puede variar significativamente de acuerdo a la composición, la conductividad y el pH del agua residual.

Tabla 2. Desempeño de CCMs utilizando aguas residuales agroalimentarias como sustrato

Agua residual	Tipo de CCM	Concentración o Carga orgánica	Volumen de trabajo (l)	Densidad de Potencia máxima (mW/m ²)	Remoción DQO (%)
Cervecería	Una cámara, cátodo al aire	1501 mg DQO/l	0,1	669	20,7
Jugos o leche de la yuca	Dos cámaras	16000 mg DQO/l	30	1771	72
Suero de queso	Dos cámaras	6700 mg DQO/l	0,31	46	94
Industria del chocolate	Dos cámaras	1459 mg DQO/l	0,4	1500	75
Industria láctea	Dos cámaras	53,22 kg DQO/m ³ .d	2	621,13	90,46
Destilería	Dos cámaras	3200 mg DQO/l	0,25	202	71,8
Jugo de manzana fermentado	Dos cámaras	3501 mg DQO/l	0,5	78	-
Tubérculos de mostaza	Dos cámaras	287 mg DQO/l	0,15	246	85
Porquerizas	Dos cámaras	1500-3250 mg DQO/l	1	1415,6 mW/m ³	-
Cáscaras de coco	Dos cámaras, flujo ascendente continuo	2690 mg DQO/l	0,6	254	32
Mataderos	Dos cámaras	4850 mg DQO/l	0,125	578	93
Procesamiento de almidón	Una cámara cátodo al aire	4852 mg DQO/l	-	238,4	98
Yogurt	Dos cámaras	8169 mg DQO/l	0,5	53,8	-

Fuente: Adaptada de Pandey *et al.*, 2016.

En aguas residuales con compuestos complejos, se pierde energía debido al metabolismo microbiano y la transferencia de electrones, ya que estos deben ser convertidos a formas simples como glucosa y ácidos grasos mediante fermentación, necesitando la presencia de bacterias fermentadoras en la cámara anódica, lo cual lleva a disminuir la producción de energía. De esta manera, en la práctica, el proceso de tratamiento en CCMs de aguas agroalimentarias complejas, que incluyen polisacáridos, proteínas y grasas, requiere un pretratamiento para ser convertidas primero a azúcares, aminoácidos y ácidos grasos volátiles (Li, Sheng, y Yu, 2013).

El pH afecta el desempeño de una CCM, debido a que bajos valores suprimen la actividad microbiana, disminuyendo la generación de electrones. (Li *et al.*, 2013). Valores de pH cercanos a la neutralidad (6,5-7,0) son recomendables para un buen desempeño de las CCMs (Prasertsung, Reungsang, y Ratanatamskul, 2012; Mansoorian, *et al.*, 2013).

La conductividad del agua residual afecta la producción de energía. En aguas residuales que contengan la misma carga orgánica se generará más energía en aquella que cuente con mayor conductividad, sin embargo altas conductividades pueden afectar la biopelícula en el ánodo (Li *et al.*, 2013).

A través de las diversas investigaciones para producir energía y depurar aguas residuales simultáneamente se ha logrado aumentar varios órdenes de magnitud en la densidad de potencia conseguida, sin embargo aún quedan muchos aspectos tecnológicos por mejorar no solo para la generación de energía sino, en la adecuada selección del agua residual a tratar debido a su complejidad y resistencia (baja conductividad) (Pandey *et al.*, 2016). En general, las aguas residuales de las industrias alimentarias son sustratos idóneos para CCMs, pero el desempeño en la producción de energía varía significativamente según las características del agua residual tratada (Li *et al.*, 2013).

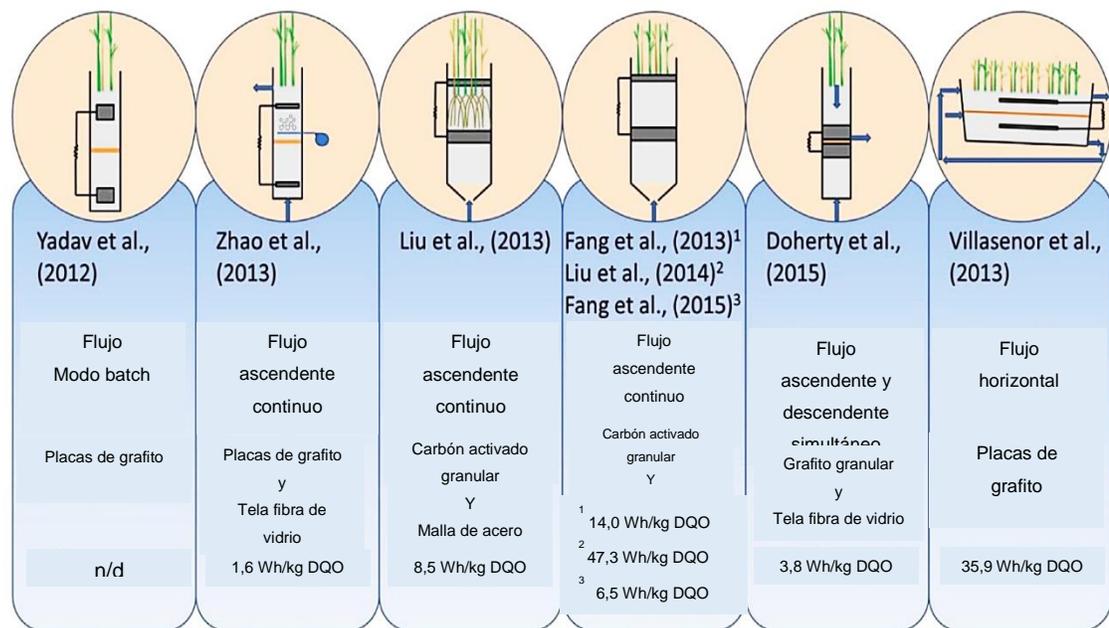
3.4 SISTEMA COMBINADO CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA-HUMEDAL ARTIFICIAL

La tecnología CCM ha avanzado significativamente en los últimos años. Diversas investigaciones han permitido optimizar diseños y configuraciones, modificar la superficie de los electrodos, seleccionar comunidades microbianas, definir las condiciones operacionales para desarrollo de la biopelícula, establecer cambios y posibilidades de la tecnología, determinar mecanismos de transferencia de

electrones, crear parámetros uniformemente aceptados para su diseño, y la integración con otros sistemas de tratamiento, tales como los humedales artificiales o construidos (Pandey *et al.*, 2016; Gude, 2016).

Los humedales construidos, especialmente los de flujo vertical, pueden desarrollar gradientes redox en la columna de agua, con ambientes aeróbicos cerca de la superficie, y anaeróbicos en el fondo del humedal (Zhao *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2015). Esta condición permite integrar células de combustible microbianas con humedales artificiales (ver Figura 9). La primera prueba de esta combinación tecnológica fue realizada por Yadav *et al.*, en el año 2012 (Liu *et al.*, 2015), y según la base de datos Science direct a noviembre de 2016 se han publicado alrededor de 20 trabajos, para analizar y mejorar el funcionamiento de esta posibilidad de sistema de tratamiento y generación de energía.

Figura 9. Configuraciones de prototipos de humedales artificiales-CCM



Fuente: Doherty *et al.*, 2015a.

La configuración del sistema utilizada en la mayoría de los estudios, realizados con prototipos a escala laboratorio, corresponde a humedales de flujo vertical, operando con flujo ascendente, utilizando electrodos de grafito o carbón, ubicando el cátodo en la superficie o cerca de ella y el ánodo en el fondo del humedal (ver Figura 9), de manera que se aseguren las condiciones redox necesarias para operación de la CCM. Debido a la gran distancia entre electrodos (25-50 cm) con este tipo de montaje, se genera un aumento de la resistencia interna de la CCM que afecta la producción de energía (Doherty *et al.*, 2015a).

Los humedales artificiales poseen la capacidad de eliminar materia orgánica con eficiencias superiores al 90%, y su rendimiento no es afectado por la presencia de CCMs. Sin embargo, la generación de energía sí puede ser afectada al integrarse al humedal por diversos factores:

- La carga orgánica afecta la CCM, debido a que la llegada al cátodo de materia orgánica en concentraciones superiores a 500 mg DQO/l, limita el oxígeno disuelto y reduce el potencial redox en la zona catódica (Villaseñor *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2014).
- La presencia de vegetación y la ubicación del cátodo en la zona radicular favorece mayor generación de energía, debido a que promueven condiciones redox aeróbicas en superficie y anaeróbicas en el fondo del humedal (Fang, *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2014; Corbella, Garfí y Puigagut, 2014); sin embargo, es necesario tener en cuenta que con el desarrollo de la vegetación, las raíces pueden llegar al ánodo produciendo microambientes aeróbicos que disminuyen el desempeño de la CCM (Doherty *et al.*, 2015a).
- El ciclo de luz-oscuridad (día y noche), afecta la generación de energía, debido a la disminución de la actividad fotosintética de la vegetación en ausencia de luz solar,

disminuyendo la disponibilidad de oxígeno en la zona catódica y por tanto la producción energética (Villaseñor *et al.*, 2013; Corbella, Garfí y Puigagut, 2016).

- La reacción de reducción del oxígeno en el cátodo es un paso limitante en la generación de energía (Doherty *et al.*, 2015a). En el cátodo las bacterias actúan como catalizadores, por tanto contar con alta superficie específica permitirá el desarrollo de alta densidad de biopelícula favoreciendo el desempeño de las CCMs. Cátodos fabricados en carbón activado granular y malla de acero inoxidable permiten grandes densidades de biopelícula en el electrodo (Liu *et al.*, 2014).

- La localización del cátodo en la superficie del humedal afecta el desempeño de las CCM debido a las fluctuaciones de la lámina de agua por la evapotranspiración de la vegetación. Según Corbella, Garfí y Puigagut (2016), la ubicación del cátodo a 1-2 cm por debajo del nivel de la lámina de agua favorece el desempeño de la CCM.

La eficiencia del sistema Humedal Artificial-Célula de Combustible Microbiana reportada en los diversos estudios es variada (Doherty *et al.*, 2015a), debido a los factores de diseño implementados en cada investigación (ver Tabla 3).

Tabla 3. Eficiencia de remoción de DQO y densidad de potencia en HA-CCM

Referencia	Concentración afluente (mg/l)	Eficiencia de remoción DQO (%)	Eficiencia Coulómbica (%)	Densidad de potencia máxima (mW/m ²)
Yadav <i>et al.</i> (2012)	8000	75,0	0,05-0,06	7,44
Fang <i>et al.</i> (2013)	180	85,7	0,58-1,71	5,62
Villaseñor <i>et al.</i> (2013)	560	90,0-95,0	0,27	20,76
Zhao <i>et al.</i> (2013)	1058	76,5	0,1-0,6	12,37
Liu <i>et al.</i> (2013)	200	94,8	0,39-1,29	12,42
Liu <i>et al.</i> (2014)	250	95,0	2,8-3,9	44,63
Doherty <i>et al.</i> (2015b)	583	64,0	0,25	10,51
Fang <i>et al.</i> (2015)	135	85,7	0,50	1,84

Fuente: Doherty *et al.*, 2015a.

La inclusión de CCMs mejora los rendimientos de eliminación de materia orgánica en los humedales, aunque tan solo entre 0,05 a 3,9% de DQO es utilizado para generación de energía en la célula de combustible (ver Tabla 3), es posible obtener eliminación de DQO superior al 75%, y máximas densidades de potencia de hasta 45 mW/m².

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 MONTAJE EXPERIMENTAL

4.1.1 Estructura general

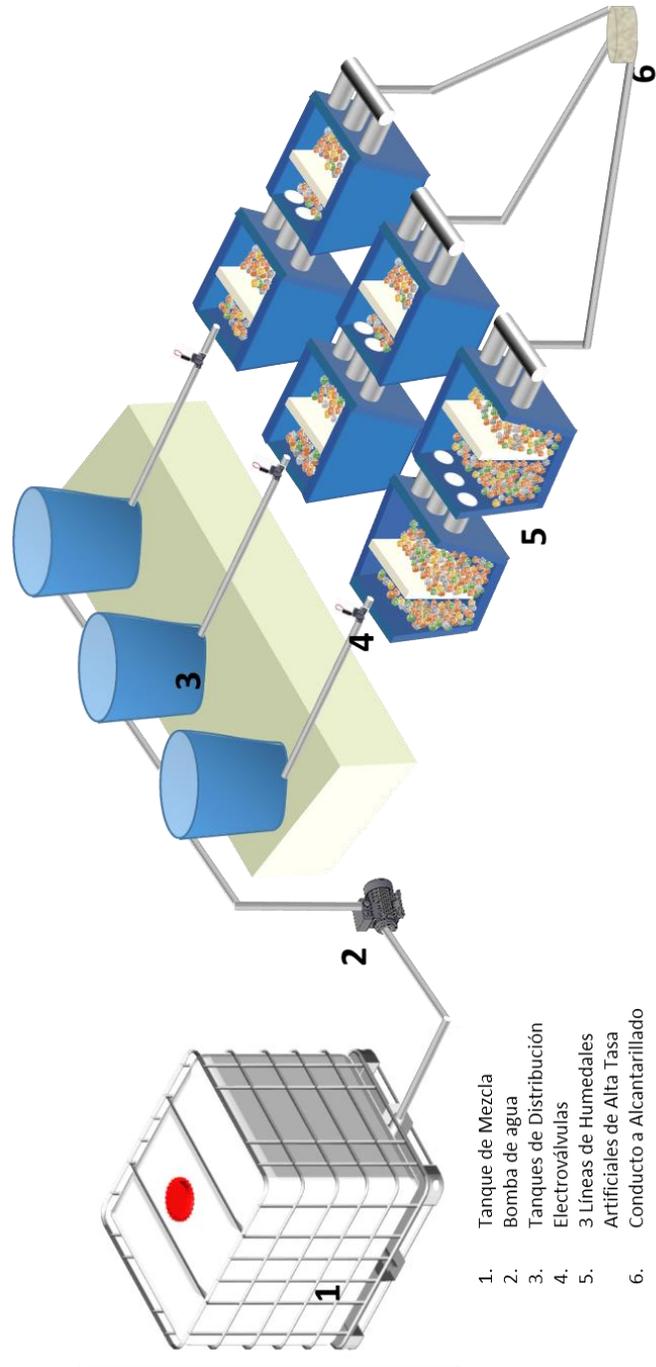
Un sistema a escala mesocosmos, de humedales artificiales de alta tasa integrando células de combustible microbianas, se utilizó para desarrollar la presente investigación de tipo experimental, con dos fases exploratorias cuantitativas de eliminación de materia orgánica y generación de energía simultáneamente.

El sistema se ubicó en la zona exterior del Centro de Caracterización de Materiales de la Universidad Industrial de Santander (UIS), en Bucaramanga (Colombia), en condiciones climáticas de bosque seco tropical subhúmedo premontano (Clasificación Holdrige).

La Figura 10 presenta la distribución de los principales elementos del montaje, constituido por un tanque de mezcla de 650 l para preparación de agua residual sintética, una bomba de impulsión de agua, y tres líneas de HAAT.

Cada línea estuvo compuesta por un tanque de distribución de 200 l, una electroválvula programable controlada por dataloger, y un tren de humedales artificiales de alta tasa, conformado por dos reactores (0,94 x 0,53 x 0,5 m cada uno), rellenos con portadores de crecimiento bacteriano (superficie específica 320 m²/m³, porosidad 94%) (Sanabria y Corzo, 2016), hasta una altura de 0,35 m en la primera fase y de 0,45 m en la segunda, conectados en serie para promover flujo en pistón.

Figura 10. Sistema experimental CCM-HAAT.

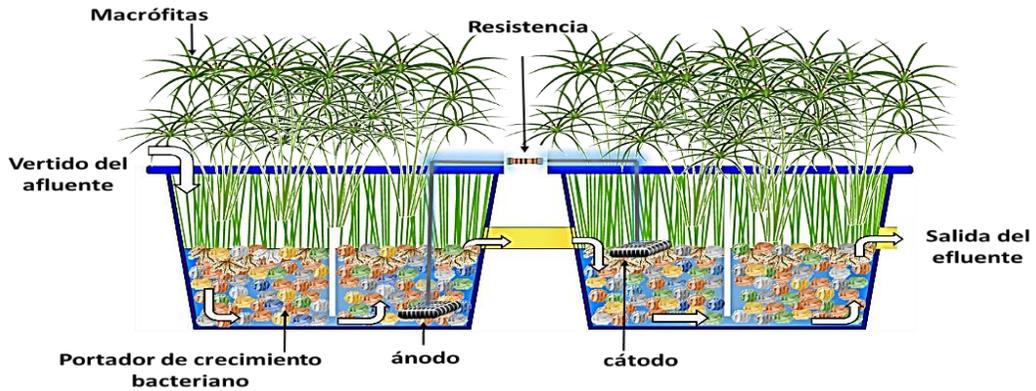


Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Célula de combustible microbiana

Cada línea de HAAT contó con una célula de combustible microbiana, con el ánodo ubicado en el fondo del primer reactor, y el cátodo en posición semisumergida en la superficie del segundo reactor (ver Figura 11).

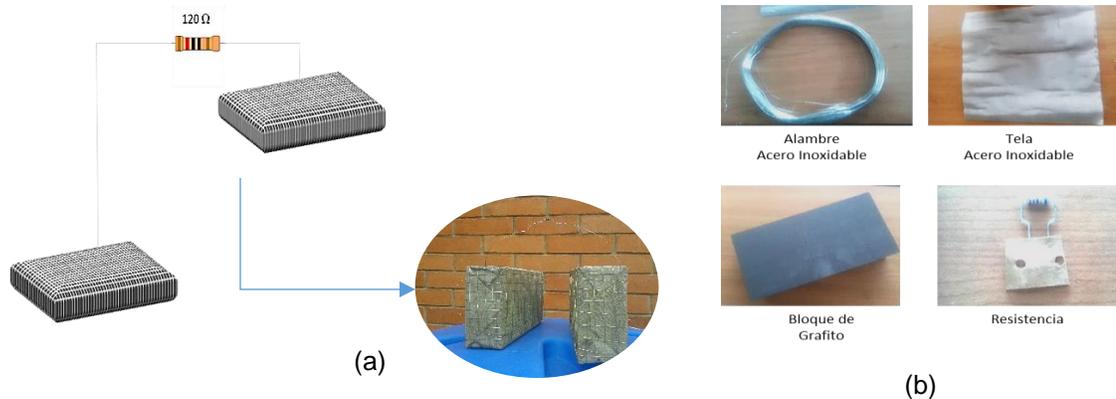
Figura 11. Esquema de vista lateral del sistema CCM-HAAT.



Fuente: Adaptada de imagen cedida por Jorge L. Díaz.

Los electrodos fueron fabricados con bloques de grafito (0,20 m x 0,10 m x 0,05 m), recubiertos por tela de acero inoxidable (Mesh 100), conectados por alambre de acero inoxidable (espesor 4 mm) y una resistencia de 120 Ω (ver Figura 12).

Figura 12. Esquema de células de combustible microbianas. (a) montaje, (b) materiales.



Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Vegetación

Cada línea fue plantada con una especie de macrofita distinta. La línea 1 con *Cyperus alternifolius*, la Línea 2 con *Heliconia burleana*, y la Línea 3 con *Zantedeschia aethiopica* (ver Figura 13), con promedio de vida de 2 meses. La densidad de plantación correspondió a 25 unidades por m².

Figura 13. Macrofitas utilizadas en el montaje experimental.



Fuente: Elaboración propia.

4.1.4 Inóculo

La biopelícula, elemento fundamental en el desempeño de los humedales artificiales, fue generada por el inoculante bacteriano comercial Biodyne® 301-PTAR.

El inoculante cuenta con 29 cepas de bacterias aeróbicas y facultativas con capacidad para degradar diferentes compuestos presentes en las aguas residuales que afectan la DBO y la DQO: grasas, proteínas, azúcares, entre otros. Su composición bacteriana (ver Figura 14) es de 1×10^8 bacterias/ml

aproximadamente, siendo el vehículo un nutriente líquido a base de proteínas de origen vegetal, azúcares y elementos minerales.

Siguiendo las recomendaciones de la empresa proveedora, cada reactor se inoculó con 1000 ml de la mezcla bacteriana por dos días, y 50 ml diariamente durante seis días, al inicio del experimento.

Figura 14. Ficha Técnica Biodyne®.



Tabla de Composición Biodyne® 301

Biodyne® 301 está compuesto por 29 cepas de microorganismos Beneficos de vida libre y con diferentes capacidades de degradación: Grasa animal, grasa vegetal, aceites, almidones, proteínas y ácido sulfhídrico.

GRUPO	CAPACIDADES
<i>Alcaligenes spp. (2)</i>	Reducción de H ₂ S para control de olores.
<i>Bacillus spp. (10)</i>	Degradación de lípidos y almidones.
<i>Candida spp.</i>	Degradación de lípidos.
<i>Lactobacillus spp. (2)</i>	Degradación de azúcares simples.
<i>Pseudomonas spp. (9)</i>	Degradación de proteínas, almidones y lípidos.
<i>Saccharomyces spp. (3)</i>	Fuente de vitaminas.
<i>Sphingobacterium spp.</i>	Degradación de proteínas y lípidos.
<i>Streptomyces spp.</i>	Degradación de celulosa y quitina.
<p># in blend = individual strains with the same genus and species name may have one or more biochemical and/or metabolic differences in their biodegradation abilities. Starch = carbohydrate polymer common in domestic and some industrial wastewater Cellulose = difficult to degrade structural carbohydrate polymers common in domestic and some industrial wastewater. Protein = amino acid polymer common in domestic and some industrial wastewater Lipid = fatty acid polymer common in domestic and some industrial wastewater Chitin = difficult to degrade structural carbohydrate polymer common in domestic and some industrial wastewater H₂S = hydrogen sulfide degradation by biological oxidation.</p> <p>Info - The isolates described above have been identified and screened for beneficial degradation capabilities prior to incorporation into the final product. They have not undergone any genetic manipulation or chemical selection techniques. Strains are re-evaluated individually and as a blend at the time of each new production run. The classical identification methods utilized generally accepted microbiological methods and utilized differential characteristics published in Bergey's Manual of Systematic Bacteriology, Volumes 1 through 4. The 16S rRNA Gene Sequence ID uses 500 base pairs and is compared to the MicroSeq database. None of the Pseudomonas fluorescens strains comprising this product are in the Biovar II group.</p>	

Fuente: Biodyne Bogotá S.A.S.

4.1.5 Agua residual

Las tres líneas de humedales artificiales fueron alimentadas durante el monitoreo con agua residual sintética, con relación carbono, nitrógeno y fósforo (C:N:P respectivamente) 100:10:1 y 100:5:1, en las fases 1 y 2 respectivamente.

Para determinar la influencia de la carga orgánica en la eficiencia de depuración y la generación de energía eléctrica, se utilizaron cargas orgánicas de 100 g DQO/m²-d, y 200 g DQO/m²-d, en el mes 1, 2, de cada fase de monitoreo. Las cargas utilizadas correspondieron a concentraciones de 250 y 500 mg/l de DBO₅, que se han reportado en la literatura para ARI de alta carga orgánica, con índice de biodegradabilidad (DBO₅/DQO) de 0,5.

El agua residual sintética fue preparada diariamente en el tanque de mezcla, combinando glucosa, cloruro de amonio, y fosfato monopotásico como fuentes de carbono, nitrógeno y fósforo respectivamente, utilizando como solvente agua potable, y agitación mecánica por 10 minutos.

Los humedales funcionaron con flujo intermitente (caudal Q=200 l/d por línea). En la primera fase, cada vertido (33,3 l) se realizó cada 4 horas a lo largo del día, con un tiempo de retención hidráulico de 1 d en cada línea. Las descargas (33,3 l) en la segunda fase se realizaron cada 2 horas, en el horario de 8 a.m. a 6 p.m., con un tiempo de retención de 1,6 días por línea.

4.2 MONITOREO DEL MODELO CCM-HAAT

Los humedales artificiales de alta tasa integrando células de combustible microbianas no han sido planteados en ninguna investigación previa, por tal razón, el enfoque adoptado en esta investigación es de tipo exploratorio experimental cuantitativo. El objeto de estudio fué el sistema CCM-HAAT, determinando los

efectos que las diferentes cargas orgánicas y la presencia de vegetación, producen en el potencial redox, la generación de energía y la eliminación de materia orgánica.

4.2.1 Etapa de arranque

En esta investigación se planteó determinar la influencia de tres especies de macrofitas en la eliminación de materia orgánica y producción de energía, siendo necesaria una etapa previa de adaptación de la vegetación al medio de soporte, debido a que bajo las condiciones climáticas del lugar donde se ubicó el mesocosmos, no se había realizado ninguna investigación previa con humedales artificiales de alta tasa. Esta etapa no estaba considerada dentro de esta investigación, y sus resultados se presentan de manera descriptiva.

En la fase de adaptación de la vegetación, se utilizó el montaje y la vegetación detallada en el numeral 4.1.1 (ver Figuras 10 y 15). El periodo de adaptación inició en Julio de 2015, finalizando en octubre del mismo año.

Figura 15. Montaje experimental con tres especies de macrofitas.



Fuente: Elaboración propia.

La respuesta de las especies del test a las condiciones climáticas, la contaminación acuática, y la presencia del medio de soporte fue negativa para las especies *Heliconia burleana* y *Zantedeschia aethiopica*, presentando estrés vegetal, junto con colonización por hongos y bacterias. Se destaca dentro de las bacterias detectadas la presencia de *Erwinia sp.*, causante de la fitopatología Pudrición Acuosa, y muerte de las plantas en las líneas 2 y 3.

La especie *Cyperus alternifolius* fue afectada en menor medida por estrés vegetal y por el hongo *Rhizoctonia sp* (ver Tabla 4), sin embargo su respuesta fue positiva, superando las condiciones experimentales, aumentando su densidad, y altura (ver Figura 15, octubre de 2015, L1).

Tabla 4. Resultados de Análisis Fitopatológicos. *Indica la enfermedad causada por el microorganismo.

Patógenos	L1	L2	L3
Hongos	<i>Rhizoctonia sp</i>	<i>Exserohilum rostratum</i> (Tizón de la hoja)* Y	<i>Pythium sp</i> (Pudrición basal)* Y
		<i>Pestalotia</i> (Pestalotiopsis)*	<i>Colletotrichum gloeosporioides</i> (Antracnosis)*
Bacterias		<i>Erwinia sp</i> (Pudrición Acuosa)*	<i>Erwinia sp</i> (Pudrición Acuosa)*

Fuente: Instituto Colombiano Agropecuario, seccional Santander.

El resultado de la etapa de adaptación de la vegetación determinó que el montaje experimental cambiara respecto al planteado, de tal forma que el sistema definitivo estuvo conformado por dos líneas de HAAT plantadas cada una con 25 unidades de *Cyperus alternifolius*, y una línea sin vegetación que funcionó como control del experimento (ver Figura 16).

Se programaron dos fases de monitoreo, con y sin aireación suplementaria, en cada fase se inspeccionó la presencia de síntomas fitopatológicos (clorosis, quemazón,

amarillamiento de hojas, etc.) en la vegetación, de tal forma que dichas afectaciones fueron las alertas para suspender el aumento de carga y el monitoreo.

Figura 16. Imagen del Montaje experimental CCM-HAAT.



Fuente: Elaboración propia.

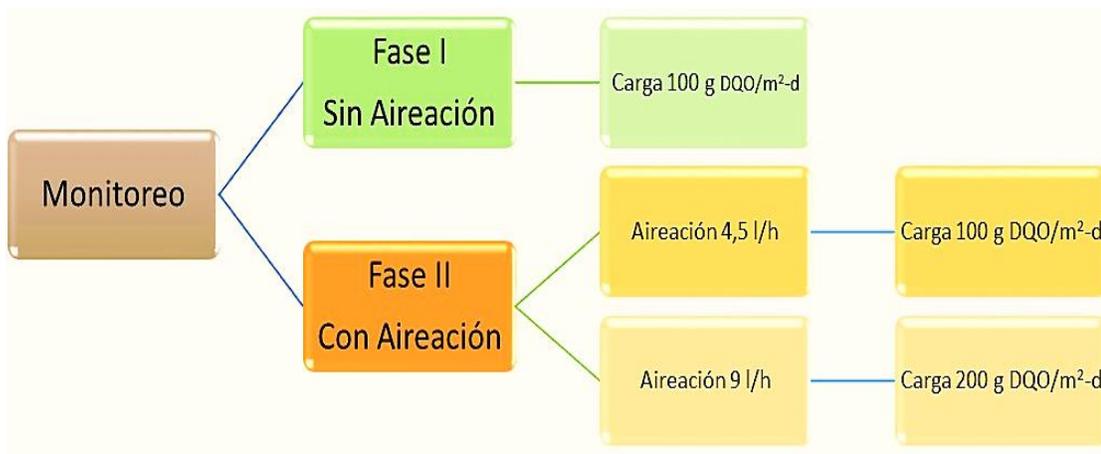
En la fase I de monitoreo (diciembre-febrero de 2016), el comportamiento de la vegetación permitió realizar tan solo la evaluación de un tipo de carga (100 g DQO/m²-d), mientras que en la fase II se evaluaron cargas de 100 g DQO/m²-d y 200 g DQO/m²-d.

La segunda fase de monitoreo (julio-octubre de 2016), incluyó bombeo superficial permanente de aire (4,5 l/h y 9 l/h por línea, para las cargas de 100 g DQO/m²-d y 200 g DQO/m²-d, respectivamente) en 8 puntos de cada línea de HAAT, para aumentar el oxígeno disponible tanto para eliminación de contaminantes como para la generación de energía, y permitir un estado saludable de la vegetación.

El esquema de monitoreo para las condiciones mencionadas se representa en la figura 17. La cuantificación de respuestas en los mesocosmos, se obtuvo mediante monitoreo de las unidades experimentales (CCM-HAAT) en dos fases. La primera de octubre 13 de 2015 a febrero 9 de 2016; y la segunda de julio 25 a octubre 6 de 2016 (ver Tabla 5), mediante la medición de temperatura, potencial redox, oxígeno

disuelto, demanda química de oxígeno, y voltaje, como se detalla en los numerales 4.2.2 a 4.2.4.

Figura 17. Esquema de monitoreo



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Esquema de monitoreo

Fase	Parámetro	Muestreo
I Diciembre 13 de 2015- Febrero 9 de 2016	En afluentes y efluentes: Temperatura Potencial redox Oxígeno disuelto DQO	Puntual una vez a la semana (Enero 25 - Febrero 9 de 2016).
	En la CCM: Voltaje	Diario (Octubre 13- Feb 2 de 2016). En continuo, dos días por línea (Febrero 3-9 de 2016).
	Potencial redox en zonas anódica y catódica.	En continuo, dos días por línea (Febrero 3-9 de 2016).
II Julio 25 - Octubre 6 de 2016.	En afluentes y efluentes: Temperatura Potencial redox Oxígeno disuelto DQO	Puntual una vez a la semana (Agosto 25 – Octubre 6 de 2016).
	En la CCM: Voltaje	Diario (Julio 25- Septiembre 28 de 2016). En continuo, dos días por línea (Septiembre 29- Octubre 6 de 2016).
	Potencial redox en zonas anódica y catódica.	En continuo, dos días por línea (Septiembre 29- Octubre 6 de 2016)

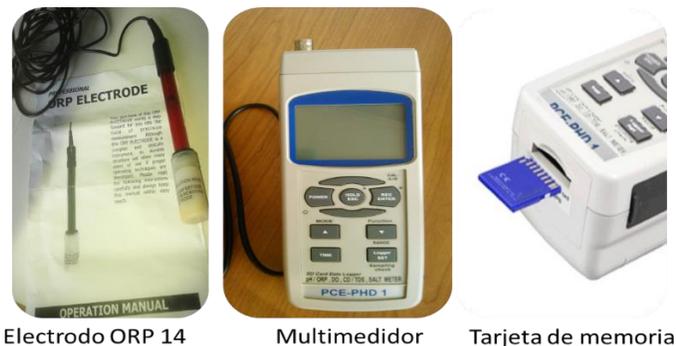
4.2.2 Potencial Redox

Las condiciones redox dentro de los humedales fueron monitoreadas en las zonas anódica (a 5 cm del fondo) y catódica (10 cm debajo de la lámina de agua) de cada línea, a través de la medida del Potencial Redox (E_h).

Su obtención se realizó semanalmente de forma instantánea, y una vez al mes se realizó cada 30 segundos durante 46 horas, para establecer las fluctuaciones que pudiesen darse por efecto de la actividad fotosintética de las macrofitas. En afluente y efluente (1 l de muestra de la primera descarga) se midió el potencial redox una vez a la semana.

El equipo para medición del E_h (ver Figura 18) incluyó sondas redox (electrodo de referencia Ag/AgCl, precisión $\pm 0,5\% + 2d$, marca PCE, modelo ORP-14), conectadas cada una a un multimedidor (PCE-PHD1) con dataloger para almacenamiento en formato Excel de las lecturas en tarjeta de memoria extraíble (16 GB).

Figura 18. Equipo medición E_h .



Electrodo ORP 14

Multimedidor

Tarjeta de memoria

Fuente: Elaboración propia

Los datos de potencial redox dentro del humedal fueron transformados para expresar el resultado en términos del electrodo estándar de hidrógeno (E_{SHE}), según las ecuaciones (4) y (5).

$$E_{SHE} = E_h - 0 \text{ mV} \quad (4)$$

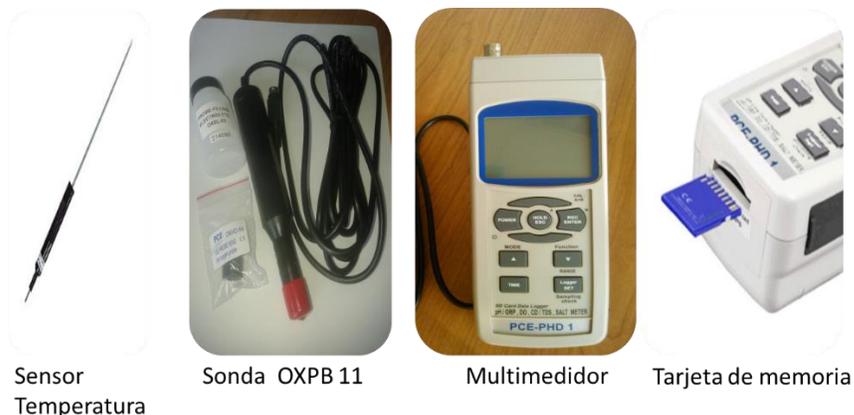
$$E_h = \text{Potencial redox medido} + 207 \text{ mV}. \quad (5)$$

Siendo E_{SHE} , el potencial redox medido en escala del electrodo estándar de hidrógeno, y E_h , el potencial medido con el electrodo Ag/AgCl corregido a la concentración de la solución de relleno del electrodo.

4.2.3 Eliminación de materia orgánica

Se realizó un seguimiento semanal del afluente y los efluentes de todas las líneas, para evaluar la eficiencia del sistema en la eliminación de materia orgánica en términos de la demanda química de oxígeno (DQO), utilizando una muestra puntual (un litro del afluente, y un litro de la primera descarga de cada uno de los efluentes). Así mismo se midió en las mismas muestras la temperatura, mediante un sensor de temperatura (precisión $\pm 0,8^\circ \text{C}$, marca PCE), y el oxígeno disuelto mediante la sonda OXPB11 (precisión 0,4 mg/l, marca PCE), conectadas al multimetedor PCE-PHD1 (ver Figura 19).

Figura 19. Equipo para medición de temperatura y oxígeno disuelto.



Fuente: Elaboración propia.

La caracterización de la DQO se realizó mediante el servicio del Laboratorio de Consultas Industriales de la Universidad Industrial de Santander, siguiendo el método titrimétrico en reflujo cerrado, según Standard Methods (5520C).

4.2.3.1 Eficiencia de remoción

La tasa de remoción de DQO fue calculada de acuerdo a la ecuación 5.

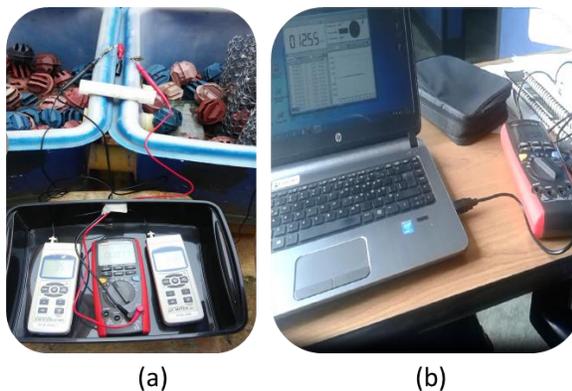
$$\text{Eficiencia de remoción \%} = \frac{DQO_a - DQO_e}{DQO_a} \times 100 \quad (5)$$

DQO_a y DQO_e representan la concentración (mg/l) del afluente y el efluente respectivamente, en cada línea de HAAT.

4.2.4 Generación de energía eléctrica

La producción de energía eléctrica fue cuantificada mediante la medición del voltaje (mV) en los extremos de la resistencia externa de cada CCM, utilizando un multímetro digital marca UNIT, modelo UT71D (precisión $\pm 0,4\% + 30$), programable para almacenamiento de lecturas, con descarga de las mismas mediante puerto USB y software para tratamiento de datos (ver Figura 20).

Figura 20. Equipo de medición de Voltaje, (a) en el ensayo en continuo, (b) descarga de datos.



Fuente: Elaboración propia.

La medición de voltaje se realizó semanalmente de forma instantánea, y una vez en cada fase se realizó cada 30 segundos durante 46 horas, para establecer la influencia que pudiese darse por efecto de la actividad fotosintética de las macrofitas. La medición diaria se realizó sistemáticamente durante la primera descarga del día, aproximadamente 6 minutos después del inicio del vertido, debido a que en la fase de adaptación de la vegetación en el nuevo montaje (L1 y L2 plantados con *Cyperus alternifolius*, y L3 sin vegetación) se observó que las CCMs presentaban picos de energía, y estos se efectuaban aproximadamente en la mitad del periodo de descarga.

El seguimiento del voltaje diario se utilizó también como indicador para iniciar los monitoreos de voltaje en continuo, de tal forma que al evaluar la generación de voltaje y establecer su punto de producción aproximadamente estable, se procedió a medir en continuo tanto el voltaje, como el potencial redox en las zonas anódica y catódica.

4.2.4.1 Desempeño eléctrico de CCMs

El objetivo esencial de una CCM es producir energía. Los principales criterios de su desempeño son la corriente máxima o la potencia máxima producida. La corriente y la potencia son variables extensivas, que dependen de la superficie del electrodo, y su desempeño es expresado como densidad de corriente o densidad de potencia con respecto al área superficial de uno de los electrodos, generalmente el área del ánodo. Existen otros criterios para monitorear el desempeño de las CCMs, sin embargo, los anteriores son los universalmente más utilizados (Oliot *et al.*, 2016).

La Ley de Ohm permite determinar los parámetros para evaluar el comportamiento eléctrico de las celdas, es decir la corriente (Ecuación 6), la potencia (Ecuación 7),

la densidad de corriente (Ecuación 8), y la densidad de potencia (Ecuación 9) (Wang *et al.*, 2010; Reveló *et al.*, 2013).

Según la ley de Ohm, la corriente eléctrica (I) que recorre un circuito eléctrico es directamente proporcional a la diferencia de potencial (V) (medido en la resistencia externa del circuito), e inversamente proporcional a la resistencia externa (R_{ext}).

$$I = \frac{V}{R_{ext}} \quad (6)$$

Donde,

I= corriente (A); V= voltaje (V); R_{ext} = resistencia externa (Ω).

La potencia, definida como la cantidad de energía generada por la CCM en un tiempo determinado, se determina a través de la ecuación 7:

$$P = \frac{V^2}{R_{ext}} \quad (7)$$

Cuanto mayor sea la potencia mayor es la energía eléctrica suministrada por la CCM y viceversa.

Finalmente, la corriente y la potencia se normalizan en función del área proyectada del ánodo (A_{an}), la cual en esta investigación es efectiva en un 30% debido al tamaño de abertura (Mesh) de la malla de acero inoxidable:

$$DI = \frac{V}{R_{ext} * A_{an}} \quad (8)$$

$$DP = \frac{V^2}{R_{ext} * A_{an}} \quad (9)$$

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los datos obtenidos en los diferentes análisis se analizaron estadísticamente mediante la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney, para comparar la influencia de la vegetación, así como el aumento de carga en la eficiencia de eliminación de materia orgánica y la generación de energía. Las diferencias entre condiciones experimentales (con o sin vegetación, con o sin suministro de aire suplementario, carga orgánica aplicada) se consideraron significativas en valores de probabilidad menores a 0,2, al ser un estudio de tipo exploratorio. Todos los análisis estadísticos se desarrollaron usando el software XLSTAT integrado a Excel. Finalmente, se compararon los resultados con estudios similares en humedales de tipo tradicional-celda de combustible microbiana, y se determinó la viabilidad técnica del sistema CCM-HAAT.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA

En humedales artificiales, los factores que más influyen la degradación de contaminantes son la temperatura, el oxígeno disuelto, el tipo de sustrato y las características del agua residual afluyente (Wu *et al.*, 2015). En este apartado se presentan y discuten los resultados de laboratorio del análisis de DQO y los valores de cada uno de los parámetros analizados *in situ*, en afluyente y efluentes.

El registro detallado de los valores de temperatura, oxígeno disuelto, potencial redox, y DQO, en afluentes y efluentes de cada línea se presentan en las tablas 7 a 18 del apartado Anexos.

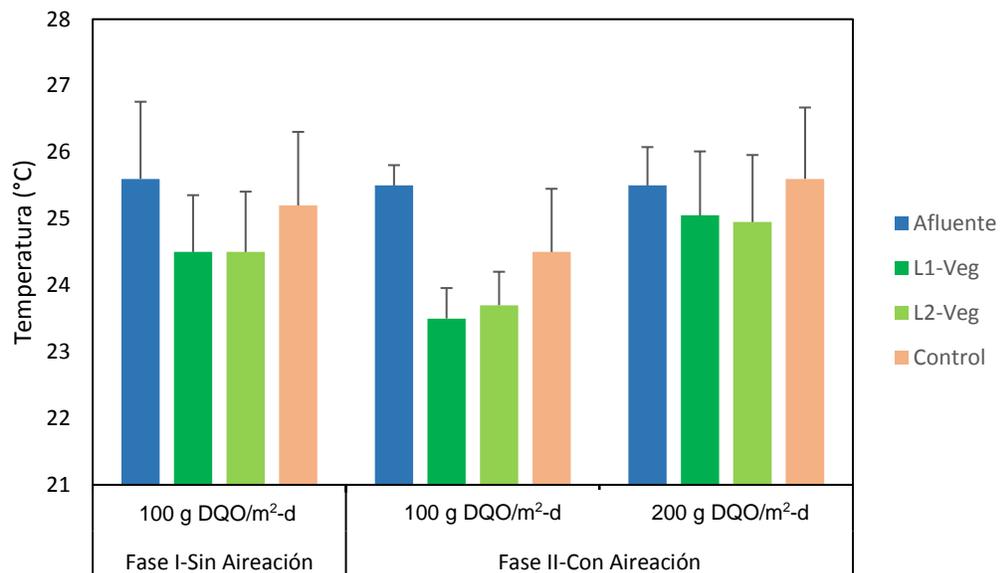
5.1.1 Temperatura

En humedales artificiales se ha establecido que la remoción de contaminantes es dependiente de la temperatura. En algunos países la aplicación de esta tecnología es limitada debido a la gran variación de temperaturas entre estaciones climáticas (verano vs. invierno) (Huang, *et al.*, 2013), en países tropicales la variación de temperatura es pequeña y favorece la remoción de contaminantes, con tasas casi 10 veces mayores a las encontradas en humedales de países no tropicales (Zhang *et al.*, 2012)

En este estudio, se realizó el seguimiento a la temperatura en el sistema CCM-HAAT, para establecer el grado de variabilidad de este parámetro según la presencia de vegetación. Los valores obtenidos (mediana de las observaciones) en las diferentes fases se describen en la figura 21.

La temperatura del afluente presentó valores alrededor de $25,5 \pm 1^\circ\text{C}$ en las dos fases de monitoreo. La temperatura en los efluentes tuvo mayor variabilidad, y presentó valores inferiores respecto del afluente, con valores en torno a $24,5 \pm 0,88^\circ\text{C}$; $23,6 \pm 0,5^\circ\text{C}$; y $25,0 \pm 1^\circ\text{C}$ en los humedales con vegetación, y de $25,2 \pm 1,1^\circ\text{C}$; $24,5 \pm 1^\circ\text{C}$, y $25,6 \pm 1^\circ\text{C}$ en el humedal control, para las fases I-Carga 100 g DQO/m²-d, fase II- Carga 100 g DQO/m²-d, y fase II- Carga 200 g DQO/m²-d respectivamente.

Figura 21. Mediana y Desviación estándar de Temperatura en afluente y efluentes, según fase y carga orgánica aplicada.



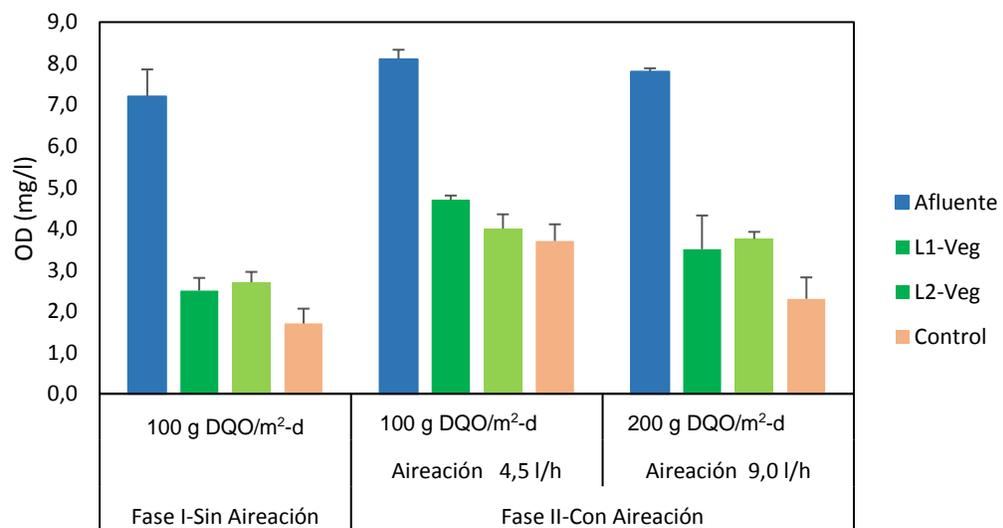
La comparación de medianas de los efluentes de humedales plantados con el humedal control, en las dos fases señaló una diferencia de aproximadamente un 1°C , sin embargo esta diferencia no fue estadísticamente significativa ($p > 0,2$). El descenso de la temperatura en los efluentes de los humedales plantados es producto de la inercia térmica de la vegetación (Brix, 1994; Kadlec y Wallace, 2008), debido a que las plantas evitan la llegada directa de la radiación solar al interior del humedal, almacenando y disipando el calor. Los rangos de temperatura mesofílicos encontrados en esta investigación permiten establecer que el sistema en estudio

presenta poca fluctuación térmica, lo cual beneficia la eliminación de contaminantes y la generación de energía; ya que la temperatura afecta los procesos microbianos y el desempeño del tratamiento tanto de humedales artificiales como en celdas de combustible microbianas, siendo las temperaturas cálidas las más favorables para remoción de contaminantes (Corbella *et al.*, 2016).

5.1.2 Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto es un factor vital que influencia las actividades microbianas y la eficiencia requerida para remoción de contaminantes (Liu *et al.*, 2016). En esta investigación se analizó la influencia de la aireación suplementaria permanente (4,5 l/h y 9 l/h, en la fase II) en la remoción de materia orgánica y generación de energía. Los valores de oxígeno disuelto en afluentes y efluentes encontrados en los monitoreos de las fases I y II se presentan en la figura 22. En el afluente su concentración osciló en torno a $7,5 \pm 0,5$ mg/l, y en los efluentes se presentaron valores en el rango de 1,7-4,8 mg/l.

Figura 22. Mediana y Desviación estándar de Oxígeno Disuelto en afluente y efluentes, según fase y carga orgánica aplicada.



La concentración de oxígeno disuelto en los efluentes fue más baja en la fase I ($2,5 \pm 0,31$; $2,7 \pm 0,25$; y $1,7 \pm 0,36$ mg/l, L1-Veg, L2-Veg, y Control respectivamente), en la cual los HAAT funcionaron sin aireación suplementaria, indicando condiciones más reductoras, respecto a la fase II que contó con aireación ($4,7 \pm 0,1$; $4,0 \pm 0,35$; $3,7 \pm 0,4$ mg/l, L1-Veg, L2-Veg, y Control respectivamente con 4,5 l/h de aire; y $3,5 \pm 0,82$; $3,8 \pm 0,17$; $2,3 \pm 0,52$ mg/l, L1-Veg, L2-Veg, y Control respectivamente, con 9,0 l/h de aire).

En la fase II, la concentración de oxígeno disuelto en los efluentes fue consistente con el aumento de la carga orgánica aplicada, de tal forma que con el aumento de carga a 200 g DQO/m²-d, la concentración de OD disminuyó aproximadamente en una unidad en todos los efluentes respecto a la concentración del OD con la carga de 100 g DQO/m²-d, indicando que el sistema responde ante el aumento de la carga orgánica aplicada, utilizando el oxígeno disuelto para remoción de la materia orgánica en las condiciones de carga de la fase II (100 vs. 200 g DQO/m²-d).

En humedales artificiales, la aireación suplementaria se ha propuesto en diversos estudios como solución para crear ambientes que permitan mayor remoción de materia orgánica, nitrógeno y fósforo (Liu *et al.*, 2016), a través de la generación de zonas aeróbicas- anaeróbicas. En humedales integrando células de combustible microbianas también se ha probado a escala laboratorio la utilidad de la aireación suplementaria. En el estudio de Oon *et al.* (2015), se utilizó una columna (55 cm altura) tipo humedal artificial de flujo ascendente y CCM, depurando agua residual sintética (66-78 g DQO/m²-d), con aporte de oxígeno suplementario, mediante bombeo a 45 cm del fondo, para mantener zonas aeróbicas y anaeróbicas necesarias para ubicación del cátodo y el ánodo; consiguiendo una concentración de oxígeno disuelto en el efluente de 3,8 mg/l, remoción total de DQO, 40% y 91% de eliminación de nitrato y amonio, y densidad de potencia de 6,12 mW/m². En esta investigación el efluente de todas las líneas en la fase II presentó valores en el

rango de 2,3-4,7 mg/l, permitiendo el manejo de cargas orgánicas de hasta 200 g DQO/m²-d y generación de energía.

El oxígeno en humedales artificiales proviene de tres fuentes, el oxígeno presente en el afluente, el transferido por la atmósfera y el aportado por la vegetación (Liu *et al.*, 2016). Los resultados de este estudio indican que la vegetación influyó el oxígeno disuelto en el sistema, siendo aproximadamente 0,5 mg/l más alto en los efluentes de los humedales que contaron con macrofitas, con diferencias significativas ($p < 0,2$) entre los efluentes de los humedales plantados y el humedal control, en las dos fases de monitoreo. Similares resultados fueron encontrados por Oon *et al.* (2017), utilizando dos columnas tipo humedal- CCM, con y sin vegetación, con y sin aireación; cuando el sistema no contó con aireación se verificó que el OD fue mayor en el sistema con vegetación, debido a que el oxígeno producido durante la fotosíntesis es difundido por las células de la planta en el entorno inmediato.

En humedales artificiales, las macrofitas favorecen condiciones más oxidadas en la zona radicular, por tanto en humedales que integran células de combustible el compartimento catódico al ubicarse cerca del sistema de raíces tendrá el oxígeno disponible para llevar a cabo la producción de energía (Oon *et al.*, 2015; Oon *et al.*, 2017).

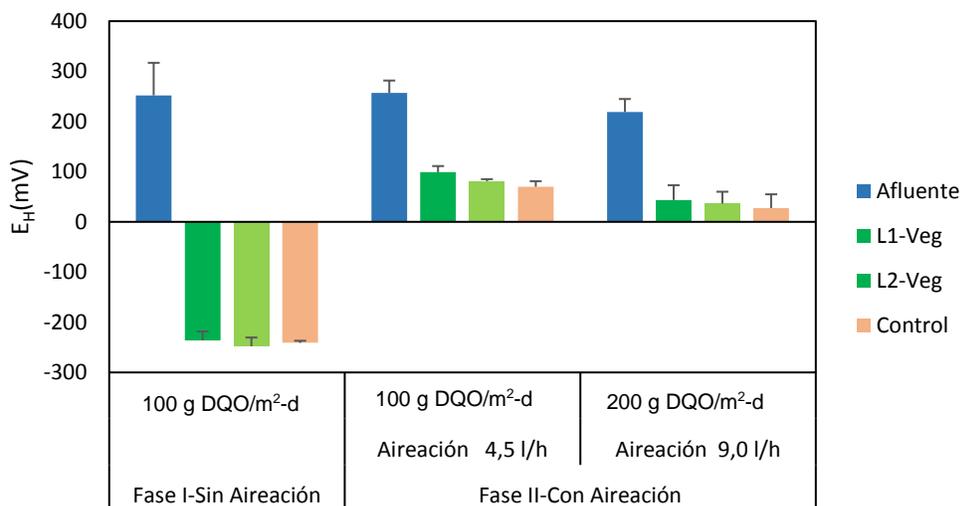
5.1.3 Potencial Redox

La remoción de contaminantes en humedales artificiales depende de varios factores, entre ellos el potencial redox (E_h). En humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal el E_h está sujeto a una gran variación tanto espacial como temporal, debido a la presencia de las plantas, las fluctuaciones del nivel del agua, la intensidad de la luz y la temperatura. A nivel espacial la variación es mayor en

profundidad que a lo largo del humedal, y más fuerte en las horas de la mañana (Corbella *et al.*, 2014).

Las medianas de los resultados de análisis del E_h en los afluentes y efluentes del mesocosmos durante las dos fase de monitoreo se muestran en las figura 23. El afluente presentó poca variabilidad, con valores de E_h entre 220-260 mV; los efluentes variaron tanto entre humedales con vegetación o sin ella, así como ante la presencia de aireación y aumento de carga orgánica.

Figura 23. Mediana y Desviación estándar de Potencial Redox en afluente y efluentes, según fase y carga orgánica aplicada.



Valores de potencial redox mayores a 100 mV son comúnmente interpretados como indicadores de ambientes aeróbicos, mientras que aquellos menores a -100 mV indican ambientes anaeróbicos. Valores de E_h entre 100 mV y -100 mV son utilizados para interpretar condiciones anóxicas (Ong *et al.*, 2010; Zhong *et al.*, 2014). En la fase I de monitoreo, los efluentes presentaron valores en el rango de -230 a -250 mV, indicando condiciones anaeróbicas. En la fase II con aireación suplementaria, el potencial redox del efluente de todas las líneas aumentó pasando a ser de tipo anóxico, con valores de E_h de entre 28 a 99 mV.

Al comparar la influencia de la vegetación, se encuentran diferencias significativas entre los humedales con vegetación y el humedal control únicamente en la fase II, siendo mayor en los HAAT con vegetación 20 mV y 14 mV, en la carga de 100 g DQO/m²-d, y de 200 g DQO/m²-d respectivamente.

En la fase II, la cual cuenta con aireación suplementaria, al comparar el potencial redox según el aumento de carga, se encuentran diferencias significativas, indicando que al aumentar la carga disminuye el potencial redox, aproximadamente en 50 mV en los HAAT con vegetación y 40 mV en el HAAT control, debido a que el oxígeno disponible para eliminación de contaminantes está siendo utilizado y reducido, reflejándose condiciones más anóxicas del efluente. Este resultado es acorde con los valores de OD encontrados en los efluentes de la fase II.

La aireación permite establecer condiciones más oxidadas en el efluente del humedal, hecho que se evidencia al comparar los E_h de la carga de 100 g DQO/m²-d de la fase I y la fase II con aireación, siendo anaeróbicos en la fase I y anóxicos en la fase II. Así mismo, es indicador de la utilidad del bombeo de aire suplementario para poder realizar un aumento de carga en el sistema planteado, permitiendo depurar cargas de hasta 200 g DQO/m²-d al contar con aireación.

Los resultados encontrados en esta investigación respecto al potencial redox son similares a los reportados por Oon *et al.*(2017), utilizando dos columnas tipo humedal-CCM, con y sin vegetación, con y sin aireación, con cargas orgánicas de 65-78 g DQO/m²-d; cuando el sistema no contó con aireación los efluentes del sistema se encontraron en el rango anóxico, mientras que cuando contó con aireación de 114 l/h los efluentes fueron de tipo aeróbico con potencial redox superior a 150 mV. La insuficiencia de oxígeno ocurre comúnmente en humedales artificiales convencionales, por lo tanto, según los resultados la aireación artificial suplementaria parece ser la alternativa más efectiva para superar esta deficiencia, sin embargo, la aireación excesiva puede llevar a sobrecostos energéticos e inhibir

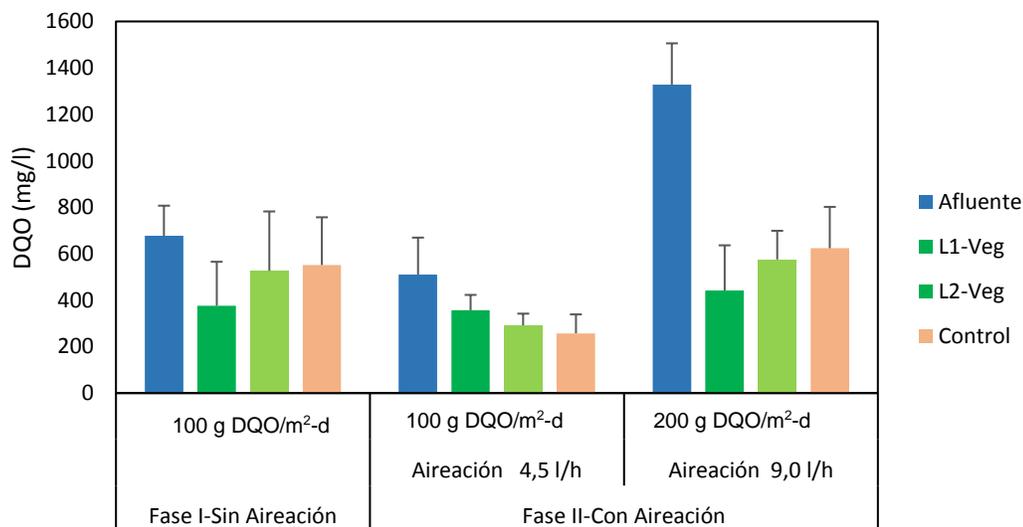
el proceso de desnitrificación, de tal forma que es necesario establecer el volumen adecuado para su suministro (Guo *et al.*, 2016; Oon *et al.*, 2017).

5.1.4 Demanda Química de Oxígeno

El objetivo principal de un sistema CCM-HAAT es la eliminación de materia orgánica y generación de energía. Diversos estudios a escala laboratorio de sistemas humedal artificial-celda de combustible microbiana han reportado eficiencias de remoción de materia orgánica que oscilan entre 65-95% (Doherty *et al.*, 2015).

Los valores de concentración de materia orgánica, cuantificada como DQO, en afluentes y efluentes del sistema en estudio se presentan en la figura 24.

Figura 24. Mediana y Desviación estándar de DQO en afluente y efluentes, según fase y carga orgánica aplicada.



En el afluente, concentraciones de 677 ± 130 mg/l, 510 ± 159 mg/l y 1328 ± 177 mg/l en promedio se manejaron para la fase I-carga 100 g DQO/m²-d, fase II-carga 100 g DQO/m²-d, y fase II-carga 200 g DQO/m²-d, respectivamente. La alta variabilidad de las concentraciones aplicadas respecto a las teóricas (500 y 1.000 mg/l de DQO),

se interpreta como errores instrumentales debidos a irregularidades en la distribución de los reactivos en el proceso de mezcla, y toma de la muestra para análisis.

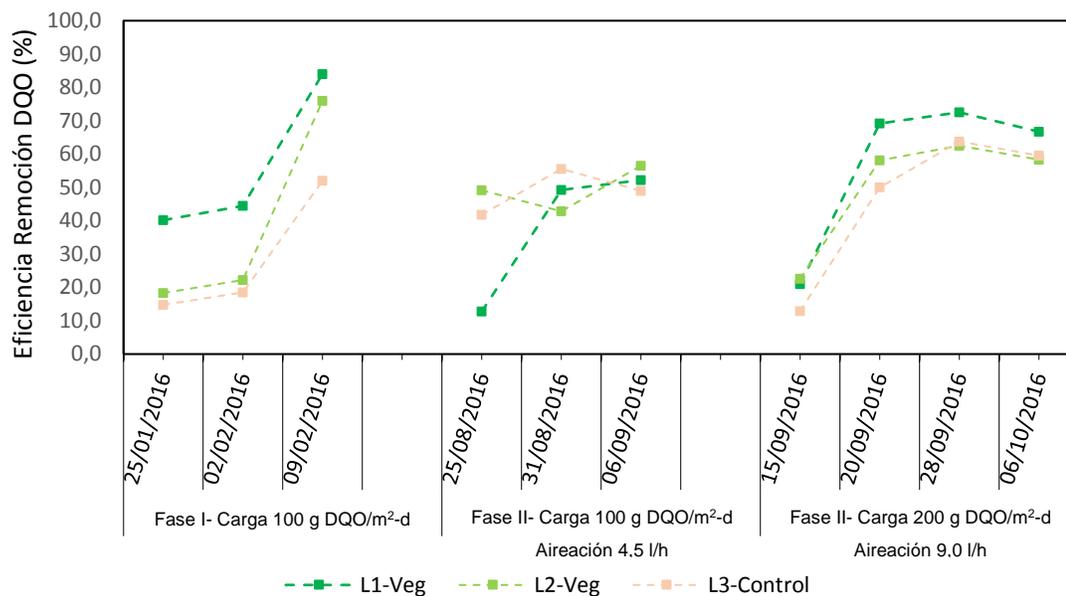
En los efluentes las concentraciones de DQO estuvieron en el rango de 376-552 mg/l, 257-356 mg/l, y 441-624 mg/l en la fase I-Carga 100 g DQO/m²-d, fase II-Carga 100 g DQO/m²-d, y fase II-carga 200 g DQO/m²-d, respectivamente. Según la normativa colombiana (Resolución 0631 de 17 de marzo de 2015, Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible) se establece como valor máximo permisible de vertido en términos de DQO, de los efluentes de las industrias de elaboración de productos alimenticios, bebidas no alcohólicas, y lácteos 600, 400, y 450 mg/l, de tal forma, los valores reportados en esta investigación se encuentran dentro de los límites establecidos por la normativa y es viable por tanto su uso como sistema de tratamiento de aguas residuales generadas en la fabricación de productos alimenticios.

En las dos fases se evidenció la capacidad del sistema CCM-HAAT para remoción de altas cargas de materia orgánica, con eficiencias de remoción de hasta 80% en los humedales plantados de la fase I, y alrededor de 65% en los humedales plantados de la fase II (ver Figura 25). La tendencia de remoción de DQO en el sistema es incremental, al aplicar una nueva carga los humedales inician con eficiencias bajas (10%-20%) y van aumentando hasta lograr en tan solo un mes eficiencias que pueden considerarse altas (60%-65%) al depurar cargas orgánicas de hasta 200 g DQO/m²-d.

Las condiciones anaeróbicas de los humedales en la fase I afectaron la vegetación cuando se realizó el aumento de carga a 200 g DQO/m²-d, presentando síntomas de estrés y toxicidad (amarillamiento, y quemazón de hojas y tallos), por esta razón se suspendió el monitoreo en la fase I y no se cuenta con datos de carga de 200 g DQO/m²-d en esta fase. Según Wu *et al.* (2015), el efecto de altas cargas orgánicas

en la vegetación ha sido demostrado en varios estudios, con síntomas de fitotoxicidad similares a los encontrados en esta investigación; indicando que es necesario reducir estos efectos, ya que impactan la eficiencia del tratamiento, utilizando un pretratamiento aeróbico/anaeróbico potente, así como dilución del afluente mediante recirculación.

Figura 25. Evolución de eficiencias de remoción en efluentes.



La eficiencia de remoción en los humedales con vegetación en la fase I-Carga de 100 g DQO/m²-d finalizando su monitoreo fué la más alta (80%), sin embargo en la fase II la aireación suplementaria permitió depurar cargas orgánicas de 200 g DQO/m²-d, con eficiencias superiores al 60%. La aireación es una de las estrategias utilizadas para depurar efluentes industriales con altas cargas orgánicas, y es únicamente justificada cuando su costo a largo plazo está suficientemente compensado por la reducción del costo del tamaño del área de los humedales (Wu *et al.*, 2015); en esta investigación el área del humedal se ha reducido sustancialmente, al depurar 200 g DQO/d en 1 m² de humedal, en contraste con lo reportado en la literatura, en los cuales se establecen valores de cargas máximas

para depurar aguas residuales domésticas de 6 g DBO/m²-d (García *et al.* 2005). Es de destacar que la reducción de área de humedal de esta investigación ha sido posible al utilizar portadores de crecimiento bacteriano de alta superficie específica (320 m²/m³) que brindan porosidad de 94% al humedal (Sanabria y Corzo, 2016).

Al comparar el efecto de la vegetación en la eficiencia de remoción de materia orgánica se evidencia su influencia en los sistemas que contaron con macrofitas, con diferencias significativas ($p < 0,2$) entre humedales plantados y el humedal control, siendo superiores en los humedales con vegetación en aproximadamente un 20% y 8% más que en los humedales control, en las fases I-Carga 100 g DQO/m²-d y fase II-Carga 200 g DQO/m²-d respectivamente. En la fase II- Carga 100 g DQO/m²-d, la eficiencia presentó alta variabilidad en líneas L2-Veg y L3-Control, aunque los valores de eficiencia fueron mayores en los humedales plantados finalizando esta etapa, no fueron estadísticamente significativos.

Al evaluar las eficiencias de remoción en la fase II según la carga orgánica aplicada (100 vs. 200 g DQO/m²-d) y aire bombeado (4,5 vs. 9,0 l/h), no se presentaron diferencias significativas en ninguna de las líneas, indicando que el sistema mantuvo la eficiencia debido al aumento del oxígeno aportado en la fase II-Carga 200 g DQO/m²-d.

Las eficiencias de remoción de materia orgánica (DQO) encontradas en esta investigación son similares (60- 80%) a las reportadas en los estudios de humedales artificiales-CCM que han utilizado cargas orgánicas altas. En el estudio a escala laboratorio de Villaseñor *et al.* (2013) utilizando un humedal de flujo subsuperficial horizontal-CCM con vegetación, depurando agua residual sintética y carga orgánica superficial de 61,1 g DQO/m²-d, se obtuvo remoción de entre el 80-85% de DQO. Según Doherty *et al.* (2015) se consiguió remoción del 79% de DQO, en columnas tipo humedal de flujo vertical ascendente a escala laboratorio, utilizando agua residual diluida de granjas porcinas, con carga orgánica de 163 g DQO/m²-d. En la

investigación de Oon *et al.* (2017), utilizando dos columnas tipo humedal-CCM, con y sin vegetación, con y sin aireación, con cargas orgánicas de 65-78 g DQO/m²-d; cuando el sistema no contó con aireación, eficiencias de 97% y 98% se reportaron para el humedal sin vegetación y control respectivamente; cuando el sistema fue aireado, se reportó 99% de remoción de materia orgánica en los humedales con vegetación. Al comparar los resultados de esta investigación con los encontrados en la literatura, se puede establecer que el sistema planteado es una opción para depuración de cargas orgánicas altas (hasta 200 g DQO/m²-d); así mismo es de destacar que en este estudio se utilizó un sistema a escala mesocosmos (escala intermedia entre escala laboratorio y escala real), por lo tanto, las eficiencias alcanzadas son más factibles de lograr a escala real que las indicadas para estudios a escala laboratorio, ya que según la comunidad científica, en torno a la temática de humedales artificiales, la experimentación a escala laboratorio puede alejarse de la realidad y es necesario intensificar la investigación a escala real (Wu *et al.* 2015).

5.2 PARÁMETROS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

En este estudio se planteó un sistema CCM-HAAT para eliminación de materia orgánica y producción de energía. El funcionamiento de la célula de combustible microbiana se evaluó a través del monitoreo de dos parámetros fundamentales en una CCM: el potencial redox, y el voltaje generado.

5.2.1 Voltaje

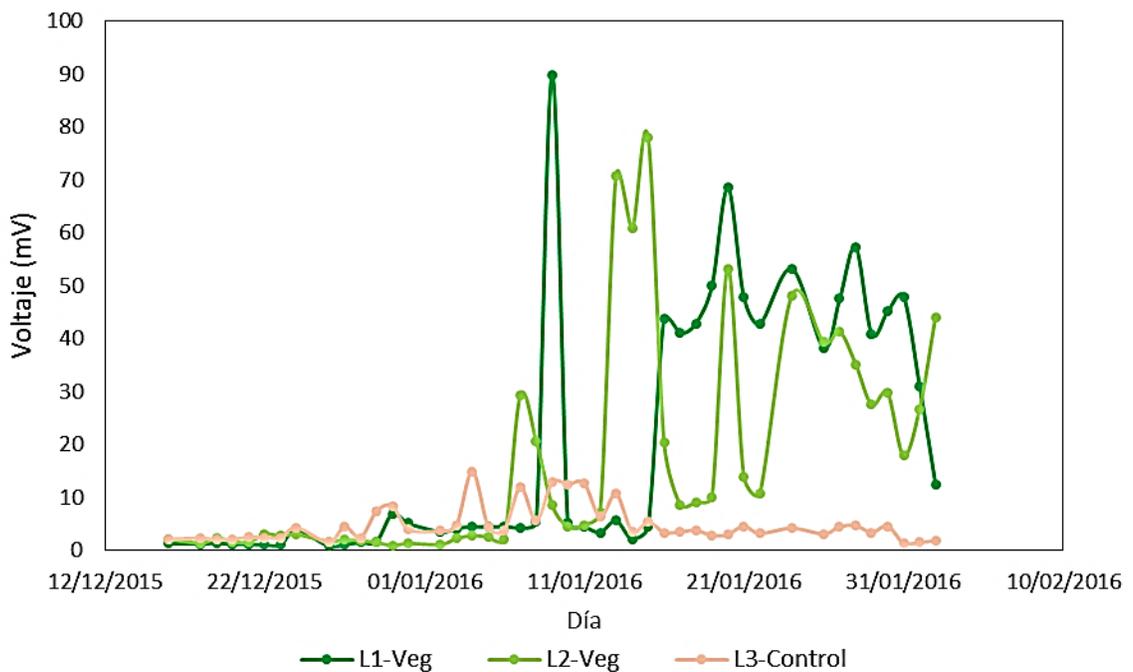
El desempeño eléctrico de una CCM se analiza a partir de las mediciones de voltaje, que se realizan en la resistencia externa conectada entre el ánodo y el cátodo, y los respectivos cálculos que se derivan de ellas (Reveló *et al.*, 2013). En esta investigación se llevaron a cabo monitoreos de la generación de voltaje tanto diariamente como en continuo.

5.2.1.1 Seguimiento diario de generación de voltaje.

En esta investigación se realizó el seguimiento diario de la generación de voltaje en tres mesocosmos CCM-HAAT. Los voltajes obtenidos se presentan en las figuras 26 y 27; los datos detallados se encuentran en el anexo (tablas 19 y 20).

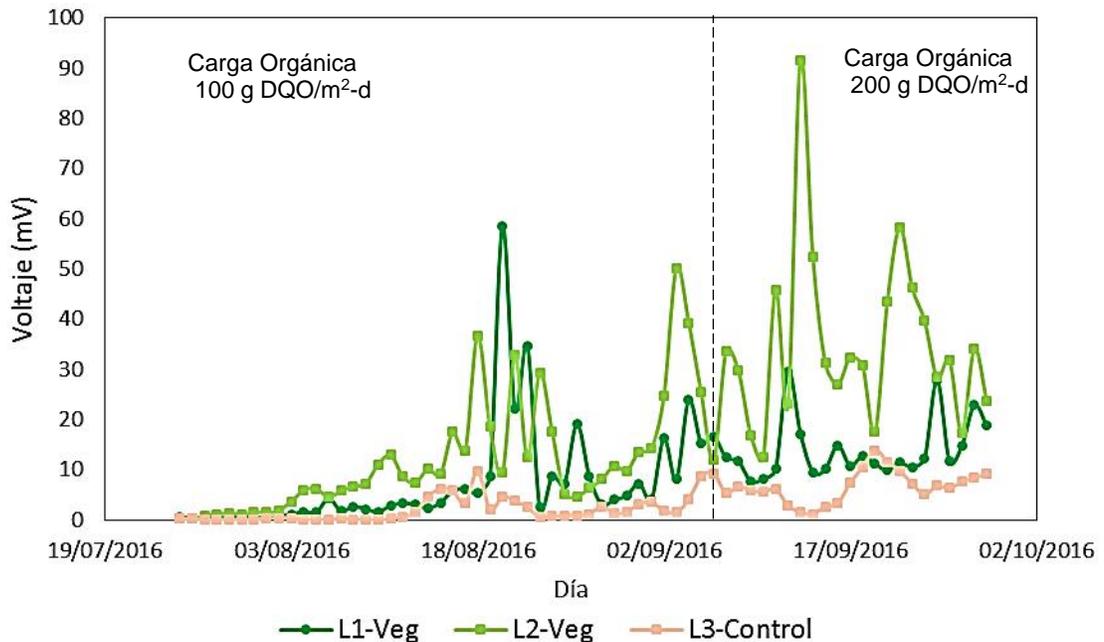
En la fase I, la generación de energía en las tres líneas de CCM-HAAT (ver Figura 26) fue bajo durante los primeros quince días (<4 mV), a partir del día 21 (enero 6 de 2016) se presentó un comportamiento oscilatorio en la generación de voltaje, con picos de voltaje de hasta 90 mV en L1-Veg y de 78 mV en L2-Veg; en L3-Control los voltajes fueron inferiores durante todo el monitoreo y no superaron los 15 mV. La presencia de fluctuaciones (ascensos y descensos) del voltaje es un comportamiento normal en CCMs, debido a los cambios de la actividad microbiana o las condiciones ambientales (Park y Ren, 2012).

Figura 26. Voltaje diario, por línea en la Fase I-Carga 100 g DQO/m²-d.



En la fase II, el seguimiento diario de generación de voltaje (ver Figura 27) se inició el 25 de Julio de 2016, y se presentaron voltajes superiores a 4 mV a partir del día 13,11 y 21 en las líneas L1-Veg, L2-Veg, y L3-Control respectivamente. Los voltajes en esta fase de monitoreo también fueron oscilatorios, con valores máximos de 59 mV, 92 mV, y 14 mV en las líneas L1-Veg, L2-Veg, y L3-Control respectivamente.

Figura 27. Voltaje diario, por línea en la Fase II.



En la fase II se manejaron dos cargas orgánicas en el afluente, desde julio 25 a septiembre 6 (carga de 100 g DQO/m²-d), y de septiembre 7 a octubre 2 (carga de 200 g DQO/m²-d), lo cual fue posible por el estado de la vegetación, situación que no se presentó en la fase I por presencia de fitotoxicidad. Por lo anterior, al comparar el voltaje generado con carga de 100 g DQO/m²-d, en las fases I (4,9±23,8 mV; 7,9±20,73 mV; 3,8±3,46 mV), y fase II (3,4±10,84 mV; 8,9±11,36 mV; 0,9±2,58 mV), en L1-Veg, L2-Veg, y L3-Control respectivamente, se aprecia que el voltaje fue superior en la fase I, sin embargo la diferencia no es estadísticamente significativa ($p > 0,2$). Según el resultado anterior, y con la finalidad de conseguir voltajes más

altos en la fase II, se decidió aumentar el periodo de muestreo de voltaje en esta fase, monitoreándolo con el aumento de carga de 200 g DQO/m²-d.

Los voltajes en la fase II-Carga 200 g DQO/m²-d, tuvieron tendencia ascendente en todas las líneas, con valores de la mediana de 11,7±5,95 mV; 31,5±17,33 mV; y 6,5±3,2 mV, en L1-Veg, L2-Veg, y L3-Control respectivamente, consiguiéndose el objetivo (aumentar el voltaje generado) establecido al aumentar el periodo de monitoreo.

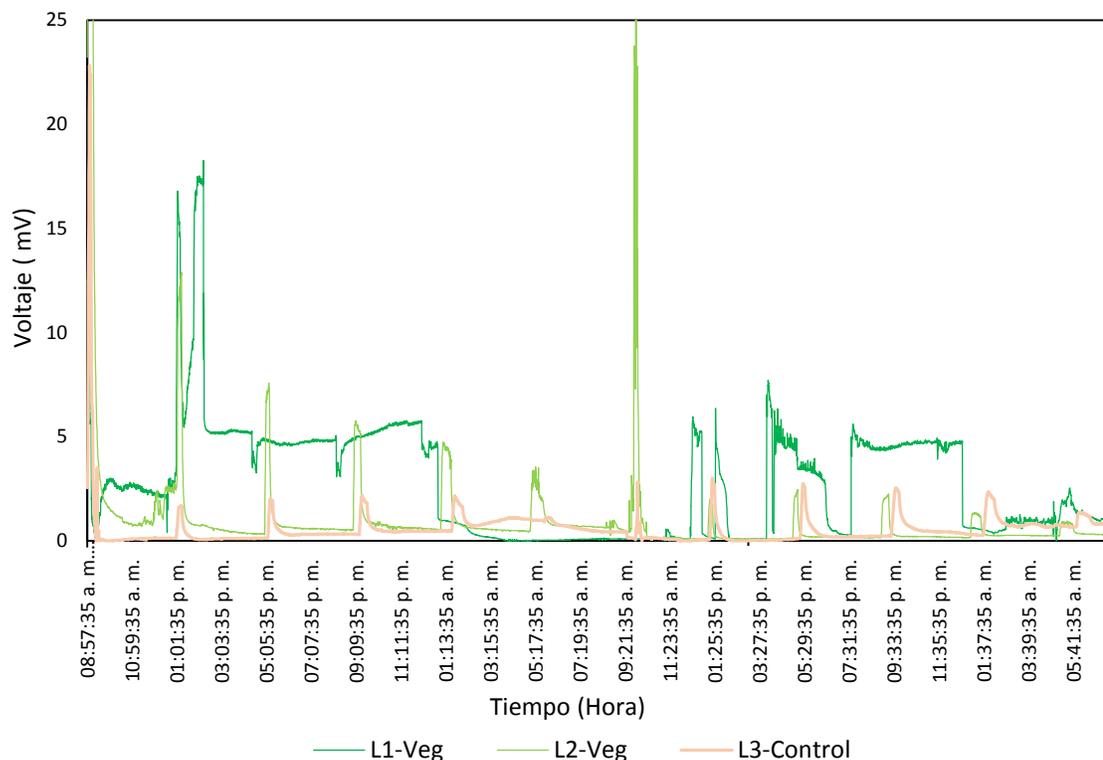
Al comparar las dos fases globalmente, se observa la influencia de la vegetación sobre la generación de energía, siendo mayores, y con diferencias estadísticamente significativas, los voltajes en los HAAT que contaron con vegetación (L1-Veg y L2-Veg) respecto al HAAT Control (L3-Control), con valores medianos en la fase I de 4,9±23,8 mV y 7,9±20,73 mV vs. 3,8±3,46 mV; y en la fase II de 7,9±9,93 mV y 13,8±17,37 mV vs. 2,6±3,52 mV. El efecto de la vegetación sobre la generación de energía en humedales artificiales-CCM ha sido analizado en varios estudios (Villaseñor *et al.*, 2013; Corbella *et al.*, 2015; Oon *et al.*, 2017) concluyendo que la vegetación contribuye a la generación de energía a través del oxígeno que transfieren al interior del humedal, el cual puede ser utilizado por el cátodo para generar electricidad; así mismo mediante los exudados y rizodepósitos (principalmente en forma de carbohidratos), que también pueden ser utilizados por las bacterias electrogénicas en el ánodo para producir energía.

5.2.1.2 Seguimiento en continuo de generación de voltaje.

En el sistema en estudio se efectuó un monitoreo en continuo de la generación de voltaje en cada CCM, cada 30 segundos, durante 46 horas, en cada una de las fases, para establecer la influencia del ciclo diario de la vegetación en la producción de energía. Los voltajes obtenidos en las fases I y II se presenta en la figuras 28 y 29. En total se registraron 5554 datos de voltaje para cada línea y fase, los cuales se detallan en el archivo digital anexo.

En la fase I, el voltaje medido en continuo en todas las líneas (ver Figura 28) tuvo un comportamiento similar al voltaje diario, con oscilaciones a lo largo del día, y ascenso del voltaje durante las descargas del afluyente (9 a.m., 1 p.m., 5 p.m., 9 p.m., 1 a.m., y 5 a.m.). Voltajes máximos de 18,25 mV; 61,73 mV; y 22,83 mV se presentaron en L1-Veg, L2-Veg, y L3-Control. Las medianas del voltaje generado correspondieron a $2,34 \pm 2,75$ mV; $0,52 \pm 4,17$ mV y $0,42 \pm 1,15$ mV, valores que presentan diferencias significativas ($p < 0,2$) entre todas las líneas. Al igual que con el seguimiento diario del voltaje, se puede establecer la influencia de la vegetación sobre la generación de voltaje, siendo mayor en los CCM-HAAT plantados, siendo estadísticamente significativa ($p < 0,2$).

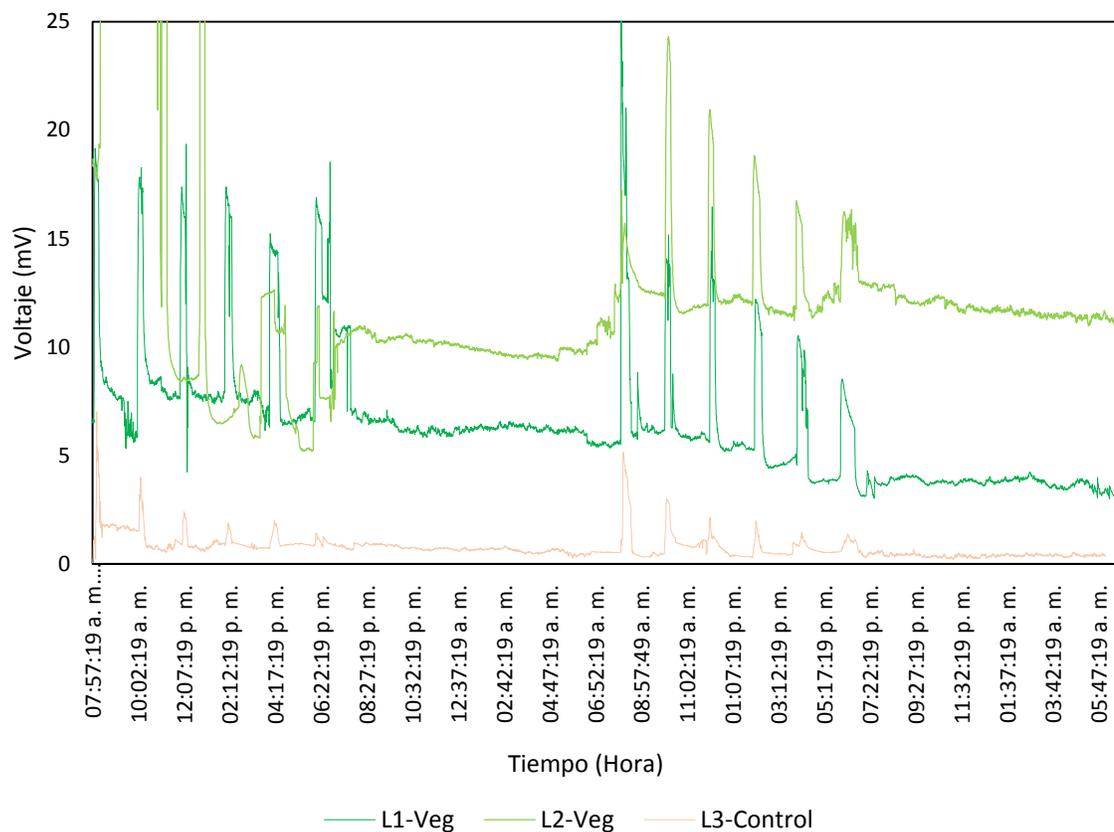
Figura 28. Voltaje en continuo-Fase I



Los voltajes generados en la fase II se presentan en la figura 29. El comportamiento del voltaje en todas las líneas fue de tipo oscilatorio, con ascensos coincidentes con

el vertido del afluente (8 a.m., 10 a.m., 12 a.m., 2 p.m., 4 p.m, y 6 p.m.). Picos de voltaje máximo de 45,03 mV, 141,32 mV, y 7,01 mV, se presentaron en L1-Veg, L2-Veg, y L3-Control respectivamente. La mediana de las observaciones de voltaje corresponden a $6,10 \pm 3,03$ mV, $11,52 \pm 22,45$ mV, y $0,64 \pm 0,55$ mV. Diferencias significativas fueron encontradas ($p < 0,2$) al comparar las tres líneas CCM-HAAT, indicando la influencia de la vegetación en la producción de energía.

Figura 29. Voltaje en continuo-Fase II



Al comparar las medianas del voltaje generado en las dos fases de monitoreo se encuentran diferencias significativas ($p < 0,2$) en L1-Veg y L2-Veg, siendo superior el voltaje generado por dichas líneas en la fase II ($6,10 \pm 3,03$ mV, $11,52 \pm 22,45$ mV) respecto a la fase I ($2,34 \pm 2,75$ mV; $0,52 \pm 4,17$ mV), indicando que las condiciones experimentales de la fase II (aireación suplementaria, carga orgánica superior) favorecen la generación de energía, debido a mayor disponibilidad de oxígeno y

materia orgánica. En L3-Control, aunque los voltajes fueron superiores en la fase II ($0,64 \pm 0,55$ mV) respecto a la fase I ($0,42 \pm 1,15$ mV), la diferencia no fue estadísticamente significativa.

En las dos fases de monitoreo se observan patrones de comportamiento en la generación de energía: 1) los voltajes cambian durante el vertido del agua residual (descargas), 2) los valores disminuyen a lo largo del día, 3) los humedales con vegetación presentan mayores voltajes que el humedal control. Los resultados anteriores tienen en común la influencia de la hidráulica del sistema.

Las fluctuaciones de la lámina de agua influyen la generación de energía, siendo mayores durante el día debido a la evaporación y la evapotranspiración, de tal forma que el cátodo puede estar expuesto a la atmósfera, incrementando la disponibilidad de oxígeno, favoreciendo así la generación de voltaje (Corbella *et al.*, 2015). En esta investigación, los voltajes fueron disminuyendo a lo largo del día, siendo mayores en horas de sol, cuando la lámina de agua estaba en niveles inferiores al de diseño.

La variación del nivel de la lámina de agua puede llegar a generar reducción del voltaje, debido a la baja disponibilidad de oxígeno cuando el cátodo se encuentra sumergido, aumentando las pérdidas por concentración, limitando el flujo de electrones (Corbella *et al.*, 2016). En esta investigación, el cátodo se encontró semisumergido, e incluso expuesto a la atmósfera, debido a la evaporación y la evapotranspiración (en los HAAT con vegetación), siendo los humedales con vegetación los que presentaron mayores descensos de la lámina de agua y por tanto generaron mayor energía.

La velocidad del flujo en CCMs afecta la transferencia de carga en el cátodo, de tal forma que velocidades altas (que propician mezcla del fluido) favorecen la generación de energía (Tsan *et al.*, 2011). Resultado similar se ha encontrado en esta investigación, observándose que la velocidad de las descargas influyó la

generación de energía. En esta investigación el vertido del afluente en cada línea CCM-HAAT se realizó en forma intermitente, utilizando depósitos de almacenamiento con electroválvulas programadas para descargas de igual volumen, pero con vaciado por gravedad, lo cual implica que la velocidad del flujo varía según se va vaciando el depósito de almacenamiento, siendo la primera descarga la más rápida y la última la de menor velocidad, en consecuencia los voltajes generados fueron mayores en la primera descarga y disminuyeron con la disminución de la velocidad del fluido.

5.2.2 Potencial Redox

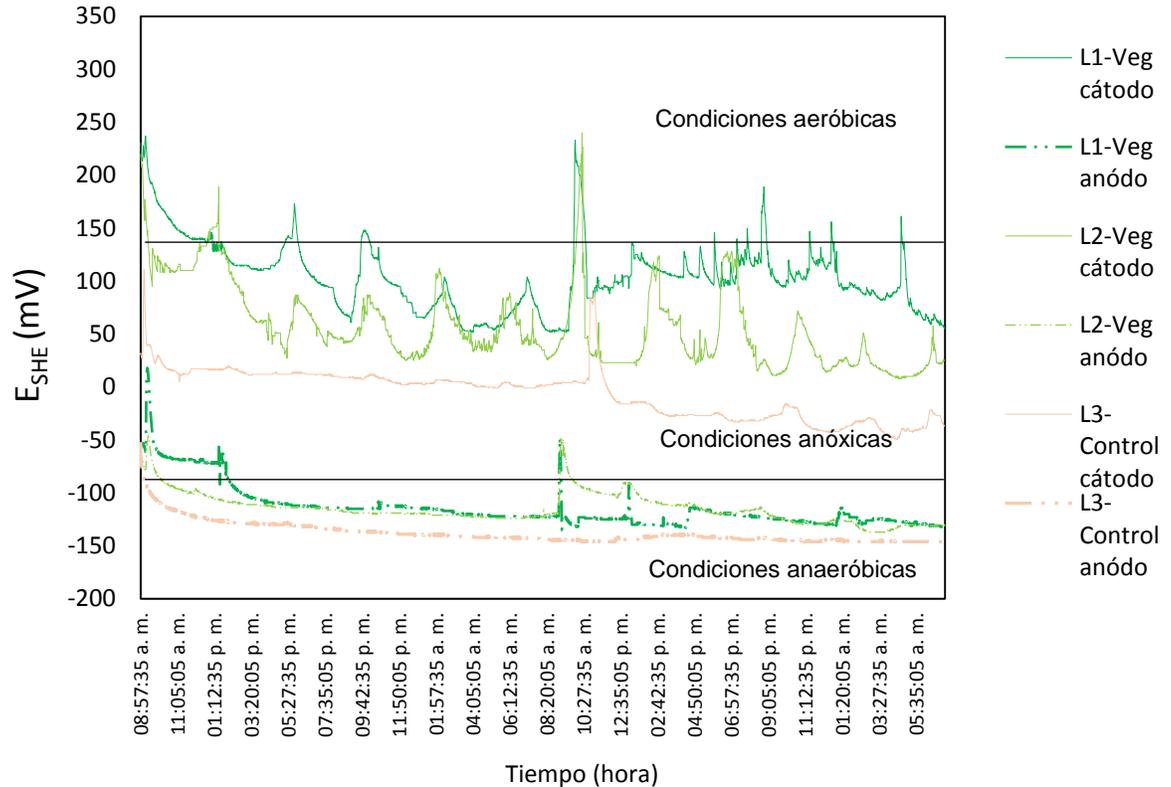
El gradiente redox entre el ánodo y el cátodo es crucial en el desarrollo de humedales artificiales-CCM; y puede ser afectado por la presencia de vegetación, la aireación, el tipo de flujo, y la carga orgánica (Doherty *et al.*, 2015a). Los resultados del potencial redox en las zonas anódica y catódica de los mesocosmos CCM-HAAT utilizados en esta investigación, medidos en continuo durante 46 horas en cada fase, se presentan en las figuras 30 y 31.

En la fase I (ver Figura 30) los valores de Eh en la zona catódica presentaron un comportamiento oscilatorio, con aumentos durante las descargas del afluente, especialmente en los humedales con vegetación, con valores de la mediana de $102 \pm 32,56$, $46 \pm 38,23$, y $2 \pm 23,07$, en L1-Veg, L2-Veg, y L3-Control respectivamente, indicando condiciones aeróbicas en L1-Veg, y condiciones anóxicas en L2-Veg y L3-Control.

En la zona anódica, el Eh presentó menos fluctuaciones, tendiendo a un comportamiento más estable, con medianas de $-121 \pm 20,25$; $-119 \pm 14,22$; y $-142 \pm 10,08$ en en L1-Veg, L2-Veg, y L3-Control respectivamente, valores que se consideran anaeróbicos. Los resultados de potencial redox coinciden con el voltaje generado, siendo mayor en la línea L1-Veg, la cual presentó las condiciones más

favorables para generación de energía (ambientes aeróbicos-anaeróbicos en cátodo y ánodo respectivamente).

Figura 30. Potencial redox en ánodo y cátodo, por línea en la Fase I-Carga 100 g DQO/m²-d.

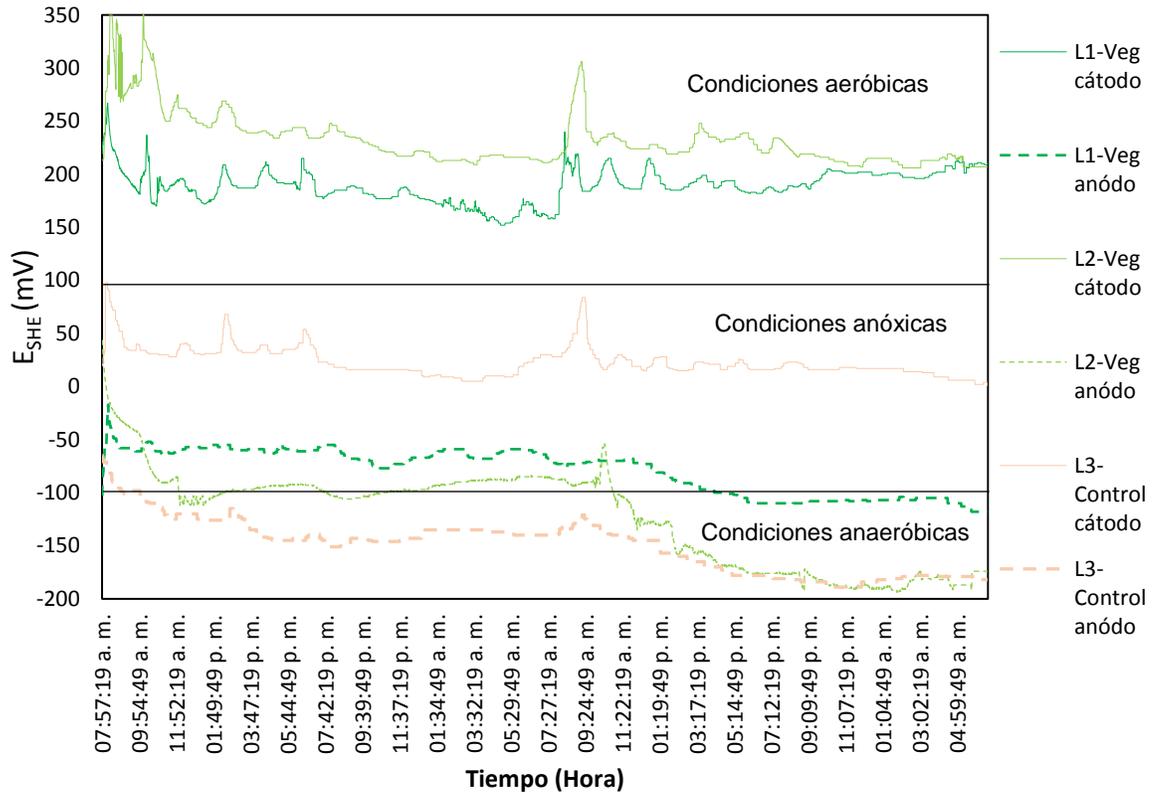


En la fase II, el comportamiento del Eh (ver Figura 31) fue similar a la fase I, con ascensos del potencial redox durante el vertido del afluyente. Medianas de los valores registrados de Eh correspondieron a $188 \pm 15,20$; $224 \pm 24,53$; $18 \pm 14,05$ en la zona catódica, y de $-70 \pm 21,16$; $-103 \pm 45,20$; $-145 \pm 25,14$ en la zona anódica; en L1-Veg, L2-Veg, y L3-Control, respectivamente.

Los valores de Eh en la zona catódica corresponden a condiciones aeróbicas en L1-Veg y L2-Veg, y anóxicas en L3-Control. En la zona anódica las condiciones fueron anóxicas en L1-Veg, y anaeróbicas en L2-Veg, y L3-Control. Los resultados anteriores coinciden con el mayor voltaje generado, siendo las condiciones más

favorables para generación de energía las aeróbicas-anaeróbicas de la línea L2-Veg.

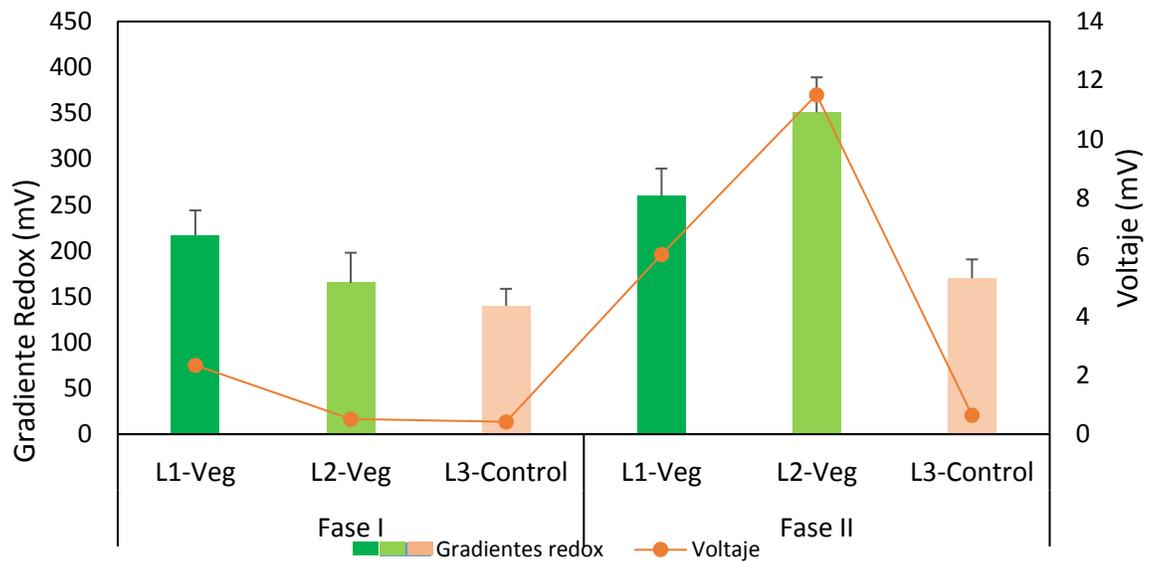
Figura 31. Potencial redox en ánodo y cátodo, por línea en la Fase II-Carga 200 g DQO/m²-d.



El gradiente redox (diferencia de Eh entre cátodo y ánodo) y la mediana de los voltajes se presentan en la figura 32. El análisis de correlación de Pearson de los valores graficados (gradiente redox vs voltaje), determinó una correlación de $R^2=0,968$, lo cual permite concluir que el voltaje está influenciado por las condiciones redox en el sistema, con relación directa ($0 < R^2 < 1$), de tal forma que si el gradiente redox aumenta, el voltaje también aumentará. Según Corbella *et al.* (2015) y Doherty *et al.* (2015^a), el gradiente redox en sistemas humedal artificial-celda de combustible microbiana es afectado por la fluctuación de la lámina de agua, la vegetación y el oxígeno disponible, factores que también influyen el voltaje, tal y como se estableció en el apartado 5.2.1.

El efecto de la vegetación sobre el potencial redox se estableció al comparar las líneas L1-Veg y L2-Veg con la línea L3-Control en las dos fases de monitoreo, presentando diferencias significativas ($p < 0,2$). La vegetación influye el potencial redox debido a que estas transfieren oxígeno de la atmósfera al interior del humedal, favoreciendo condiciones más aeróbicas en la zona de raíces.

Figura 32. Comparación Gradiente Redox y Voltaje por Fase.



El efecto de la aireación suplementaria se determinó al comparar en cada línea, los potenciales redox en la zona catódica de las dos fases, concluyéndose que en la fase II fueron superiores (45,7%; 79,5%; y 88,9%) respecto a los de la fase I, por lo tanto la aireación suplementaria contribuye al aumento del oxígeno disponible en la zona cercana a la superficie del humedal, generando la zona aeróbica necesaria para la producción de energía.

5.3 VIABILIDAD TÉCNICA DEL SISTEMA CCM-HAAT

La tecnología humedal artificial-celda de combustible microbiana, para depuración de aguas residuales y generación de energía simultáneamente, se encuentra en su

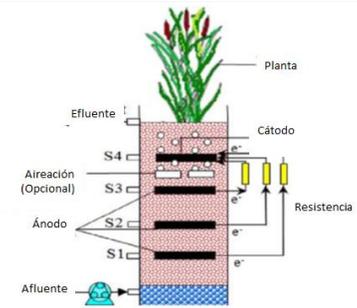
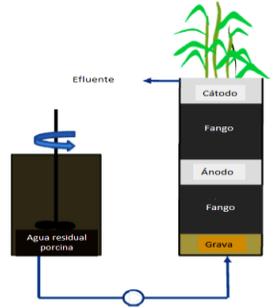
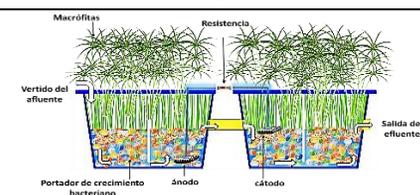
fase de desarrollo, en un estadio inicial (Oon et al., 2016). Diversas investigaciones a nivel internacional buscan la optimización de esta prometedora opción, especialmente en cuanto al aumento de la generación de energía se refiere (Doherty et al., 2015a), ya que los valores reportados de voltajes y densidades de potencia son bajos (9-55 mW/m²), y su uso solo podría darse en equipos de baja entrada de energía (Corbella y Puigagut, 2015).

La viabilidad técnica en el desarrollo de productos está definida como un estudio de función, rendimiento y restricciones que puedan afectar a la consecución de un sistema aceptable. En este estudio se definió como objetivo evaluar la viabilidad técnica del sistema CCM-HAAT, con este fin se ha caracterizado su desempeño en seis escenarios (con y sin aireación suplementaria, cargas orgánicas de 100 y 200 g DQO/m²-d, con y sin vegetación) en los apartados 5-1 a 5-2, definiendo el escenario óptimo para implementación, el cual se concretó como un humedal artificial de alta tasa, compuesto por dos reactores conectados en serie, lámina de agua de 0,45 m, superficie total de humedal 1 m², con vegetación (25 unidades/m² de *Cyperus alternifolius*), integrando una celda de combustible microbiana (ánodo en el fondo del primer reactor y cátodo semisumergido en la superficie del segundo reactor), aireación suplementaria (9 l/h) en superficie, descargas cada 2 horas durante el día (8 a.m-6 p.m.), tiempo hidráulico de retención de 1,6 d, carga orgánica máxima 200 gr DQO/m²-d.

Para finalizar el análisis de viabilidad del sistema planteado, en este apartado se comparan humedales artificiales-celda de combustible microbiana, de investigaciones disponibles en la literatura a nivel internacional, con los mesocosmos de esta investigación (ver tabla 6). Las investigaciones seleccionadas, que han sido catalogadas como viables (Doherty et al., 2015a), han utilizado concentraciones de DQO (250-1100 mg/l) similares a las usadas en esta investigación, y cargas orgánicas de 0,15-163 g DQO/m²-d, difiriendo en el tipo de montaje experimental.

Tabla 6. Comparación humedales artificiales-celdas de combustible microbianas

Referencia	Concentración (mg/l)	Carga orgánica superficial (g DQO/m ² -d)	Eficiencia remoción DQO (%)	Densidad de Potencia Máxima (mW/m ²)	Resistencia externa (Ω)	Imagen
Villaseñor <i>et al.</i> (2013)	560	31,1*	90-95	43	120	
	1100	61,1*	80-85	3,57	120	
Liu <i>et al.</i> (2014)	250	0,15	95	32 Sin vegetación	1000	
				39 Ánodo con rizosfera		
	45 Cátodo con rizosfera					
	24 Sin vegetación					
500	0,30	86,7	29 Ánodo con rizosfera			
			33 Cátodo con rizosfera			

Referencia	Concentración (mg/l)	Carga orgánica superficial (g DQO/m ² -d)	Eficiencia remoción DQO (%)	Densidad de Potencia Máxima (mW/m ²)	Resistencia externa (Ω)	Imagen
Oon <i>et al.</i> (2015)	300-350	66-78	100	6,12	1000	
Doherty <i>et al.</i> (2015c)	583	163	79	0,163**	950	
Esta Investigación.	677±130	135±26	56 ***	10,58 sin aireación	120	
	510±159	102±32	50 ***	55,48 con aireación		
	1328±177	265±35	65 ***			

*DQO soluble, **mW/m³, *** con vegetación.

Dentro de los sistemas comparados, el sistema CCM-HAAT planteado en esta investigación ha conseguido una gran ventaja en cuanto a la carga orgánica que ha sido posible depurar (>200 g DQO/m²-d), gracias al uso de portadores de crecimiento bacteriano con alta superficie específica (320 m²/m³) (Sanabria y Corzo, 2016), que permiten depurar altas cargas orgánicas en menor superficie de terreno (García *et al.*, 2005, recomiendan 6 g DBO/m²-d para aguas domésticas). Aunque en términos de eficiencia logró un 65% de remoción de materia orgánica, algunas mejoras pueden implementarse para aumentar su eficiencia tales como la recirculación del efluente.

La densidad de energía máxima (55,48 mW/m²) en el sistema CCM-HAAT, fue el mayor valor reportado en los estudios analizados, aspecto que lo sitúa dentro de las opciones viables, de la tecnología humedal artificial-celda de combustible microbiana; sin embargo, es un valor bajo para ser utilizado como fuente de energía de dispositivos electrónicos, por tanto requiere evaluar aspectos de la arquitectura de la CCM para aumentar la energía generada y optimizar el sistema, tales como la reducción de la resistencia interna mediante una malla de menor Mesh, el aumento del área de los electrodos para aumentar la densidad de bacterias electrogénicas, el uso de mayor resistencia externa ($>1000\Omega$), ya que la utilizada en el circuito de las CCMs de las tres líneas de humedales (120 Ω) fue baja y por tanto la producción de energía también lo fue. Según Doherty *et al.* (2015b) y Zhang *et al.* (2011) para tener alta producción de energía en menor tiempo es necesario utilizar resistencias externas altas, ya que ellas facilitan el desarrollo de la biopelícula electrogénica en menor tiempo.

6 CONCLUSIONES

En esta investigación se evaluó la viabilidad técnica de un sistema celda de combustible microbiana-humedal artificial de alta tasa (CCM-HAAT), para la generación de energía y depuración de aguas residuales de alta carga orgánica, considerando tres factores claves, identificados en la literatura disponible a nivel mundial en el área de la tecnología en cuestión: la vegetación, la carga orgánica, y la aireación suplementaria.

El estudio demostró que el sistema puede depurar cargas orgánicas altas (>200 g DQO/m²-d), utilizando vegetación (*Cyperus alternifolius*), con tiempo hidráulico de retención de 1,6 días, y aireación suplementaria en superficie (9 l/h), con eficiencia de 65% en la remoción de materia orgánica, generando voltajes de hasta 141,32 mV, y densidad de potencia de 55,48 mW/m².

Debido a la densidad de potencia del sistema y la eficiencia de remoción de materia orgánica logradas en el CCM-HAAT, se establece que tiene un gran potencial para ser desarrollado, implementando algunas mejoras técnicas, de tal forma que se logre su optimización antes de ser escalado para aplicaciones prácticas en escala real, tratando aguas residuales con cargas orgánicas altas, tales como los efluentes generados en las industrias agroalimentarias.

Los factores de diseño implementados (vegetación, carga orgánica, aireación suplementaria), influenciaron el desempeño del sistema CCM-HAAT. La vegetación afecta las condiciones redox dentro del humedal, en especial cerca de la superficie, donde se encuentra la zona radicular de *C. alternifolius*, debido a que esta transmite oxígeno al interior del lecho, aumentando el potencial redox, creando un ambiente aeróbico que favorece la eliminación de materia orgánica y generación de energía.

Las cargas orgánicas altas influyen en el desempeño del humedal. En condiciones anaeróbicas y sin aireación suplementaria, el sistema depura cargas orgánicas de 100 g DQO/m²-d, con eficiencia de 56%, y produce densidad de potencia máxima de 10,58 mW/m², al aumentar la carga a 200 g DQO/m²-d, la vegetación se afecta e incluso muere. En condiciones de mayor disponibilidad de oxígeno (aireación suplementaria), el sistema puede manejar mayores cargas orgánicas, con eficiencias de 50% y 65% para cargas de 100 y 200 g DQO/m²-d, sin embargo ante un aumento de carga mayor la vegetación se afecta, y las condiciones no son favorables para depuración del agua residual, ni para generación de energía.

6.1 LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Diversos estudios a escala laboratorio han puesto en evidencia que al utilizar aguas residuales sintéticas las eficiencias son mayores, debido a la alta biodegradabilidad del sustrato empleado, en especial cuando la glucosa es usada como fuente de materia orgánica (Gude, 2016). Los resultados de esta investigación han demostrado la viabilidad y el desempeño del sistema CCM-HAAT para remoción de materia orgánica simultáneamente con la generación de energía. Sin embargo, la experimentación fue llevada a cabo empleando agua residual sintética como sustrato, y es posible que la respuesta en especial de la generación de energía sea afectada cuando se depuren aguas residuales reales.

6.2 FUTURA INVESTIGACIÓN

En este estudio se ha evaluado la posibilidad de generar energía y depurar aguas residuales, en un sistema innovador (Humedal Artificial de Alta Tasa y Célula de Combustible Microbiana), determinando que es viable su integración. Sin embargo, es necesario llevar a cabo estudios en el sistema planteado que permitan su optimización, tales como:

- Realizar un estudio de caracterización de la resistencia interna del circuito de la CCM, determinando sus curvas de polarización, para determinar aspectos de su configuración (materiales, resistencia externa, etc.) susceptibles de cambio, que permitan aumentar la energía producida en el sistema.
- Reducir la distancia entre electrodos para determinar su influencia en la eficiencia de producción de energía.
- Probar diferentes agua residuales industriales agroalimentarias, para establecer la respuesta del sistema ante las diversas composiciones de los efluentes.
- Determinar las eficiencias del sistema por separado, ubicando una línea de humedales sin célula de combustible microbiana, para establecer la contribución de la CCM en la eliminación de materia orgánica.
- Desarrollar un estudio de análisis de comunidades bacterianas en los electrodos para establecer la presencia o ausencia de bacteria inhibidoras del proceso bioelectroquímico.

REFERENCIAS

ALBUQUERQUE, Antonio; OLIVEIRA, José; SEMITELA, Sabrina; AMARAL, Leonor. Evaluation of the effectiveness of horizontal subsurface flow constructed wetlands for different media. *Journal of Environmental Sciences*. 2010, vol. 22, no. 6, p. 820–825. ISSN 1001-0742.

ARIAS, Carlos Alberto y BRIX, Hans. Phosphorus removal in constructed wetlands: can suitable alternative media be identified?. *Water Science and Technology*. 2005, vol. 51, no.9, p. 275-282. ISSN 0273-1223.

CHEN, Yi, WEN, Yue, ZHOU, Junwei, TANG, Zhiru, LI, Ling, ZHOU, Qi, VYMAZAL, Jan. Effects of cattail biomass on sulfate removal and carbon sources competition in subsurface-flow constructed wetlands treating secondary effluent. *Water Research*. 2014, vol. 59, p.1–10. ISSN 0043-1354.

CORBELLA, Clara; GARFI, Mariana; PUIGAGUT, Jaume. Vertical redox profiles in treatment wetlands as function of hydraulic regime and macrophytes presence: surveying the optimal scenario for microbial fuel cell implementation. *Science of the Total Environment*. 2014, vol. 470-471, p. 754-758. ISSN 0048-9697.

CORBELLA, Clara y PUIGAGUT, Jaume. Microbial fuel cells implemented in constructed wetlands: Fundamentals, current research and future perspectives. *Contributions to Science. Open Acces*. 2015, no. 11, p.113-120. ISSN 1575-6343.

CORBELLA, Clara; GUIVERNAU, Miriam; VIÑAS, Marc; PUIGAGUT, Jaume. Operational, design and microbial aspects related to power production with microbial fuel cells implemented in constructed wetlands. *Water Research*. 2015, vol. 84, p. 232-242. ISSN 0043-1354.

Corbella, Clara; Garfi, Mariana; Puigagut, Jaume. Long-term assessment of best cathode position to maximize microbial fuel cell performance in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment*. 2016, vol. 563-564, p. 448-455. ISSN 0048-9697.

DANE, Departamento Nacional de Estadística. Boletín Técnico Encuesta Ambiental Industrial. Colombia, junio 24 de 2014. 28 pp.

DÍAZ-CHÁVEZ, Rocio; BERNDES, Göran; NEARY, Daniel, NETO, André Elia; FALL, Mamadou. Water quality assessment of bioenergy production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2011, vol. 5, p. 445–63. ISSN 1932-1031.

DING, Yi; WANG, Wei; SONG, Xin-shan; y WANG, Yu-hui. Spatial distribution characteristics of environmental parameters and nitrogenous compounds in horizontal subsurface flow constructed wetland treating high nitrogen-content wastewater. *Ecological Engineering*. 2014, vol. 70, p. 446–449. ISSN 0925-8574.

DOHERTY, Liam; ZHAO, Yaqian; ZHAO, Xiaohong; HU, Yuansheng; HAO, Xiaodi; XU, Lei; LIU, Ranbin. A review of a recently emerged technology: Constructed wetland-Microbial fuel cells. *Water Research*. 2015a, vol. 85, p. 38–45. ISSN 0043-1354.

DOHERTY, Liam; ZHAO, Yaqian; ZHAO, Xiaohong; WANG, Wenke. Nutrient and organics removal from swine slurry with simultaneous electricity generation in an alum sludge-based constructed wetland incorporating microbial fuel cell technology. *Chemical Engineering Journal*. 2015b, vol. 266, p. 74-81. ISSN 1385-8947.

DOHERTY, Liam; ZHAO, Yaqian; ZHAO, Xiaohong; WANG, Wenke. The effects of electrode spacing and flow direction on the performance of microbial fuel cell-constructed wetland. *Ecological Engineering*. 2015c, vol. 79, p. 8-14. ISSN 0925-8574.

FANG, Zhou; SONG, Hai-Liang; CANG, Ning; LI, Xain-Ning. Performance of microbial fuel cell coupled constructed wetland system for decolorization of azo dye and bioelectricity generation. *Bioresource Technology*. 2013, vol. 144, p.165–171. ISSN 0960-8524.

FANG, Zhou; SONG, Hai-Liang; CANG, Ning; LI, Xian-ning. Electricity production from azo dye wastewater using a microbial fuel cell coupled constructed wetland operating under different operating conditions. *Biosensors and Bioelectronics*. 2015, vol. 68, p. 135-141. ISSN 0956-5663.

FAO. Statistical yearbook: world food and agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013, 307 pp.

FERREIRA MERCURI, Emilio Graciano; JAKUBIAK KUMATA, Albert Yuji; AMARAL, Emille Bertha; SIMÕES VITULE, Jean Ricardo. Energy by Microbial Fuel Cells: Scientometric global synthesis and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, vol. 65, p. 832–840. ISSN 1364-0321.

FRICKE, Katia; HARNISCH, Falk; SHRÖDER, Uwe. On the use of cyclic voltammetry for the study of anodic electron transfer microbial fuel cells. *Energy and Environmental Science*. 2008, vol. 1, p. 144-147. ISSN 1754-5706.

GARCÍA, Joan; AGUIRRE, Paula; BARRAGÁN, Jesus; MUJERIEGO, Rafael; MATAMOROS, Víctor; BAYONA, Josep Maria. Effect of key design parameters on the efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*. 2005, vol. 25, p. 405–418. ISSN 0925-8574.

GARCÍA, Joan y CORZO, Angélica. Depuración con Humedales Construidos, Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. Universidad Politécnica de Cataluña. 2008. Licencia Creative Commons. <http://upcommons.upc.edu/e-prints/handle/2117/2474>.

GARCÍA, Joan; ROUSSEAU, Diederik.P.L.; MORATÓ, Jordi; LESAGE, Els; MATAMOROS, Víctor; BAYONA, Josep Maria. Contaminant Removal Processes in Subsurface-Flow Constructed Wetlands: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2010, vol. 40, no. 7, p. 561-661. ISSN 1547-6537.

GUDE, Veera Gnaneswar. Wastewater treatment in microbial fuel cells- an overview. *Journal of Cleaner Production*. 2016, vol. 122, p. 287-307. ISSN 0959-6526.

GUO, Luchen; HE, Kelj; WU, Shubiao; SUN, Hao; WANG, Yanfei; HUANG, Xu; DONG, Renjie. Optimization of high-rate TN removal in a novel constructed wetland integrated with microelectrolysis system treating high-strength digestate supernatant. *Journal of Environmental Management*. 2016, vol. 178, p. 42–51. ISSN 0301-4797.

HOOGERS, Gregor. Fuel Cell Technology Handbook. Boca Raton: CRC Press. 2003, 360 pp. ISBN 9780849308772.

HUANG, Juan; CAI, Wenshu; ZHONG, Qiushuang; WANG, Shine. Influence of temperature on micro-environment, plant eco-physiology and nitrogen removal effect in subsurface flow constructed wetland. *Ecological Engineering*.2013, vol. 60, p. 242–248. ISSN 0925-8574.

LI, Chang Ming y QIAO, Yan. Advances in Microbial Fuel Cells. En: Nanostructured and Advanced Materials for Fuel Cells. Jian y Shen editores. CRC Press, 2013, 600 pp. ISBN 9781466512504.

KADLEC, Robert y WALLACE, Scott. Treatment wetlands. 2nd ed. Boca Raton, Fla: CRC Press, 2008, 1016 pp. ISBN 978-1-56670-526-4.

KLINE, Keith L.; OLADOSU, Gbadebo A.; WOLFE, Amy K.; PERLACK, Robert D.; DALE, Virginia H.; McMAHON Matthew. Biofuel feedstock assessment for selected countries. Technical report, OAK Ridge National Laboratory and U. S. Department of Energy, 2008, 243 pp.

LARMINIE, James y DICKS, Andrew. Fuel Cell Systems Explained. Chischester: John Wiley and Sons, 2000, 428 pp. ISBN: 978-0-470-84857-9.

LETO, Claudia; TUTTOLOMONDO, Teresa; La BELLA, Salvatore; LEONE, Raffaele; LICATA, Mario. Effects of plant species in a horizontal subsurface flow constructed wetland-phytoremediation of treated urban wastewater with *Cyperus alternifolius* L. and *Typha latifolia* L. in the West of Sicily (Italy). *Ecological Engineering*. 2013, vol. 61, p. 282–291. ISSN 0925-8574.

LI, Wen-Wei; SHENG, Guo-Ping; YU, Han-Qing. Electricity generation from food industry wastewater using microbial fuel cell technology. En Food Industry Wastes: Assessment and Recuperation of Commodities. Kosseva y Webb editors, 2013, 312 pp. ISBN 9780123919281.

LIN, Hongjian; WU, Xiao; HU, Bo; ZHU, Jun. Microbial electrochemical systems for agro-industrial wastewater remediation and renewable products generation: A review. *Archives of Microbiology and Biotechnology*. 2014, vol. 1, p. 1-20.

LIU, Shentan; SONG, Hailiang; WEI, Size; YANG, Fei; LI, Xianning. Bio-cathode materials evaluation and configuration optimization for power output of vertical

subsurface flow constructed wetland- Microbial fuel cell systems. *Bioresource Technology*. 2014, vol. 166, p. 575-583. ISSN 0960-8524.

LIU, Ranbin; ZHAO, Yaqian; DOHERTY, Liam; HU, Yuansheng; HAO, Xiaodi. A review of incorporation of constructed wetland with other treatment processes. *Chemical Engineering Journal*. 2015, vol. 279, p. 220-230. ISSN 1385-8947.

LIU Huaging; HU, Zhen; ZHANG, Jian; NGO, Huu Hao; GUO, Wenshan; LIANG, Shuang; FAN, Jinlin; LU, Shaoyong; WU, Haiming. Optimizations on supply and distribution of dissolved oxygen in constructed wetlands: A review. *Bioresource Technology*. 2016, vol. 214, p. 797–805. ISSN 0960-8524.

LOGAN, Bruce E.; HAMELERS, Bert; ROZENDAL, René; SCHRÖEDER, Uwe; KELLER, Jürg; FREGUIA, Stefano; AELTERMAN, Peter; VERSTRAETE, Willy; RABAEY, Korneel. Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environmental Science and Technology*. 2006, vol. 20, no.40, p. 5181-5192. ISSN 1520-5851.

LU, Shibao; ZHANG, Xialing; WANG, Jianhua; PEI, Liang. Impacts of different media on constructed wetlands for rural household sewage treatment. *Journal of Cleaner Production*. 2016, vol. 127, p. 325-330. ISSN 0959-6526.

MANDER, Ülo; DOTRO, Gabriela; EBIE, Yoshitaka; TOWPRAYOON, Sirintornthep; CHIEMCHASRI, Chart; FURLAN NOGUEIRA, Sandra; JAMSRANJAV, Baasansuren; KASAK, Kuno; TRUU, Jaak; TOURNEBIZE, Julien; MITSCH, William J. Greenhouse gas emission in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering*. 2014, vol. 66, p. 19-35. ISSN 0925-8574.

MANSOORIAN, Hossein Jafari; MAHVI, Amir Hossein; JAFARI, Ahmad Jonidi; AMIN, Mohammad Mehdi; RAJABIZADEH, Ahmad; KHANJANI, Narges. Bioelectricity generation using two chamber microbial fuel cell treating wastewater from food processing. *Enzyme and Microbial Technology*. 2013, vol. 52, p. 352-357. ISSN 0141-0229.

MENESES-JÁCOME, Alexander; DÍAZ-CHÁVEZ, Rocío; VELÁSQUEZ-ARREDONDO, Héctor I.; CÁRDENAS-CHÁVEZ, Diana L.; PARRA, Roberto; RUÍZ-COLORADO, Angela A. Sustainable Energy from agro-industrial wastewaters in Latin-America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, vol. 56, p. 1249–1262. ISSN 1364-0321.

MESQUITA, M.C.; ALBUQUERQUE, A.; AMARAL, L.; NOGUEIRA, R. Effect of vegetation on the performance of horizontal subsurface flow constructed wetlands with lightweight expanded clay aggregates. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2013, vol. 10, no.3, p. 433–442. ISSN 1735-2630.

MING, Li; ZHOU, Qiaohong; TAO, Min; WANG, Ying; JIANG, Lijuang; WU, Zhenbin. Comparative study of microbial community structure in different filter media of constructed wetland. *Journal of Environmental Sciences*. 2010, vol. 22, no. 1, p. 127–133. ISSN 1001-0742.

MISRA, Anil Kumar. Climate change and challenges of water and food security. *International Journal of sustainable built environment*. 2014, vol. 3, no.1, p. 153–165. ISSN 2212-6090.

NIU, Rui-Hua; WANG, Yu-Hui; SONG, Xin-Shan; LIAO, Wei-Dong. Hydraulic performance evaluation on horizontal constructed wetland using tracer test. En: *Environment, Energy and Sustainable Development – Sung, Kao and Chen (eds)*. 2014. ISBN 978-1-138-00053-7.

NIVALA, Jaime; KNOWLES, Paul; DOTRO, Gabriela; GARCÍA, Joan; WALLACE, Scott. Review: Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Measurement, modeling and management. *Water Research*. 2012, vol. 46, p. 1625-1640. ISSN 0043-1354.

NG, Wun Jern. *Industrial Wastewater Treatment*. Londres. Imperial College Press. 2006, 164 pp. ISBN 1-86094-580-5.

OLIOT, Manon; GALIER, Sylvain; ROUX-DE BALMANN, H elene; BERGEL, Alain. Ion transport in microbial fuel cells: Key roles, theory and critical review. *Applied Energy*. 2016, vol. 183, p. 1682–1704. ISSN 0306-2619.

ONG, Soon-An; UCHIYAMA, Katsuhiko; INADAMA, Daisuke; ISHIDA, Yuji; YAMAGIWA, Kazuaki. Performance evaluation of laboratory scale up-flow constructed wetlands with different designs and emergent plants. *Bioresources Technology*. 2010, vol. 101 no. 19, p. 7239–7244. ISSN 0960-8524.

OON, Yoong-Ling; ONG, Soon-An; HO, Li-Ngee; WONG, Yee-Shian; OON, Yoong-Sin; LEHL, Harvinder Kaur; THUNG, Wei-Eng. Hybrid system up-flow constructed wetland integrated with microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and electricity generation. *Bioresource Technology*. 2015, vol. 186, p. 270–275. ISSN 0960-8524.

OON, Yoong-Ling; ONG, Soon-An; HO, Li-Ngee; WONG, Yee-Shian; DAHALAN, Farrah Aini; OON, Yoong-Sin; LEHL, Harvinder Kaur; THUNG, Wei-Eng. Synergistic effect of up-flow constructed wetland and microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and energy recovery. *Bioresource Technology*. 2016, vol. 203, p. 190–197. ISSN 0960-8524.

OON, Yoong-Ling; ONG, Soon-An; HO, Li-Ngee; WONG, Yee-Shian; DAHALAN, Farrah Aini; OON, Yoong-Sin; LEHL, Harvinder Kaur; THUNG, Wei-Eng; NORADIBA, Nordin. Role of macrophyte and effect of supplementary aeration in up-flow constructed wetland-microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and energy recovery. *Bioresource Technology*. 2017, vol. 224, p. 265-275. ISSN 0960-8524.

ORGANIZACIÓN DE NACIONES UNIDAS - AGUA. Climate Change Adaptation: The Pivotal Role of Water. 2012. http://www.unwater.org/downloads/unw_ccpol_web.pdf.

OTÁLORA, Alejandra Patricia. Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de Caño Gandúl. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 2011, 163 pp.

PANDEY, Prashant; SHINDE, Vikas N.; DEOPURKAR, Raiendra L.; KALE, Sharad P.; PATIL, Sunil A.; PANT, Deepak. Recent advances in the use of different substrates in microbial fuel cells toward wastewater treatment and simultaneous energy recovery. *Applied Energy*. 2016, vol. 168, p. 706-723. ISSN 0306-2619.

PANDEY, Vimal Chandra; BAJPAI, Omesh; SINGH, Nandita. Energy crops in sustainable phytoremediation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, vol. 54, p. 58–73. ISSN 1364-0321.

PARK, Jae-Do y REN, Zhivong. Hysteresis controller based maximum power point tracking energy harvesting system for microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*. 2012, vol. 205, p. 151–156. ISSN 0378-7753.

PEDESCOLL, Anna. Clogging in horizontal subsurface constructed wetlands. Measures, desing factors and prevention strategies. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 2010. 213 pp.

PEDESCOLL, Anna; PASSOS, Fabiana; ALBA, Elisenda; PUIGAGUT, Jaume; GARCÍA, Joan. Mechanical resistance properties of gravel used in subsurface flow constructed wetlands: implications for clogging. *Water Science and Technology*. 2011, vol. 63, no.9, p. 1801-1807. ISSN 1996-9732.

PRASERTSUNG, Nattakam; REUNGSANG, Alissara; RATANATAMSKUL, Chavalit. Alkalinity of Cassava Wastewater Feed in Anodic Enhance Electricity Generation by a Single Chamber Microbial Fuel Cells. *Engineering Journal*. 2012, vol. 16, no. 5, p.17-28. ISSN 0125-8281.

REVELO, Dolly M.; HURTADO, Nelson H.; RUIZ Jaime O. Celdas de combustible microbianas (CCMS): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. *Información tecnológica*. 2013, vol. 40, no.6, p. 17-28. ISSN 0718-0764.

RUÍZ, José Antonio; RAMOS, Pedro; SÁNCHEZ, Guillermo. Cambio climático: ¿un desafío a nuestro alcance?: XIII Jornadas Ambientales. Ediciones Universidad de Salamanca. 2009, 376 pp. ISBN 9788478002733.

SAEED, Tanveer y SUN, Guangzhi. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *Journal of Environmental Management*. 2012, vol. 112, p. 429-448. ISSN 0301-4797.

SANABRIA ARTÚNDUAGA, Otoniel Alfonso. HUMEDAR I: alternativa innovadora de bajo costo para depurar aguas residuales en países en vía de desarrollo. *Revista ambiental agua, aire y suelo*. 2006, vol. 1, no. 1, p. 84-91. ISSN 1900-9178.

SANABRIA, Otoniel Alfonso y CORZO, Angélica. Portador para el crecimiento bacteriano en reactores biológicos para cultivos fijos de configuración poliédrica-rombocuboctaedro. Superintendencia de Industria y Comercio. Colombia. Patente resolución 37697, de junio 16 de 2016.

STEFANAKIS, Alexandros I. y TSIHRINTZIS, Vassilios A. Effects of loading, resting period, temperature, porous media, vegetation and aeration on performance of pilot-scale vertical flow constructed wetlands. *Chemical Engineering Journal*. 2012, vol. 181–182, p. 416–430. ISSN 1385-8947.

SUN, Haimeng; HU, Zhen; ZHANG, Jian; WU, Weizhong; LIANG, Shuang; LU, Shaoyong; LIU, Huaging. Determination of hydraulic flow patterns in constructed wetlands using hydrogen and oxygen isotopes. *Journal of Molecular Liquids*. 2016, vol. 223, p. 775–780. ISSN 0167-7322.

SUN, Haishu; XU, Shengjun; ZHUANG, Guogiang; ZHUANG, Xuliang. Performance and recent improvement in microbial fuel cells for simultaneous carbon and nitrogen removal: A review. *Journal of Environmental Sciences*. 2016, vol. 39, p. 242–248. ISSN 1001-0742.

TRAM VO, Phuong; HAO NGO, Huu; GUO Wenshan; ZHOU, John L.; NGUYEN Phuoc Dan; LISTOWSKI, Andrzej; WANG, Xiaochang C. A mini review on the impacts of climate change on wastewater reclamation and reuse. *Science of the total environment*. 2014, vol. 494-495, p. 9-17. ISSN 0048-9697.

TSAN, Wang Chin; MING, Yang Che; SHENG, Chen Zih; SHUAI, Tseng. Effect of biometric flow channel on the power generation at different Reynolds numbers in the single chamber of rumen microbial fuel cells (RMFCs). *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011, vol. 36, p. 9242-9251. ISSN 0360-3199.

TÜRKER, Onur Can; TÜRE, Cengiz; BÖCÜK, Harun; ÇIÇEK, Arzu; YAKAR, Anil. Role of plants and vegetation structure on boron (B) removal process in constructed wetlands. *Ecological Engineering*. 2016, vol. 88, p. 143–152. ISSN 0925-8574.

TYROLLER, Lina; ROUSSEAU, Diederik P.L.; SANTA, Santa; GARCÍA. Joan. Application of the gas tracer method for measuring oxygen transfer rates in subsurface flow constructed wetlands. *Water Research*. 2010, vol. 44, no. 14, p. 4217-4225. ISSN 0043-1354.

VELÁSQUEZ-ORTA, S.B.; HEAD, I.M.; CURTIS, T.P.; SCOTT, K. Factors affecting current production in microbial fuel cells using different industrial wastewaters. *Bioresource Technology*. 2011, vol. 102, p. 5105-5112. ISSN 0960-8524.

VENKATA MOHAN, S.; VELVIZHI, G.; MODESTRA, J. A.; SRIKANTH, S. Microbial fuel cell: Critical factors regulating bio-catalyzed electrochemical process and recent advancements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, vol. 40, p. 779–797. ISSN 1364-0321.

VILLASEÑOR, J.; CAPILLA, P.; RODRIGO, M.A.; CANIZARES, P.; FERNANDEZ, F.J. Operation of a horizontal subsurface flow constructed wetland e microbial fuel cell treating wastewater under different organic loading rates. *Water Research*. 2013, vol. 47, p. 6731-6738. ISSN 0043-1354.

VOGL, Andreas; BISCHOF, Franz y WICHERN, Marc. Single chamber microbial fuel cells for high strength wastewater and blackwater treatment— A comparison of idealized wastewater, synthetic human blackwater, and diluted pig manure. *Biochemical Engineering Journal*. 2016, vol. 115, p. 64–71. ISSN 1369-703X.

VYMAZAL, Jan y KRÖPFELOVÁ, Lenka. Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of the field experience. *Science of the environment*. 2009, vol. 407, p. 3911–3922. ISSN 0048-9697.

VYMAZAL, Jan. Review: Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*. 2010, vol. 2, p. 530-549. ISSN 2073-4441.

WANG, Chin-Tsan; CHEN, Wei-Jung; HUANG, Ruei-Yao. Influence of growth curve phase on electricity performance of microbial fuel cell by *Escherichia coli*. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010, vol. 35, no.13, p.7217-7223. ISSN 0360-3199.

WU, Shubiao; KUSCHK, Peter; WIESNER, Arndt; MÜLLER, Jochen; SAAD, Rania A.B; DONG, Renije. Sulphur transformations in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering*. 2013, vol. 52, p. 278–289. ISSN 0925-8574.

WU, Shubiao; KUSCHK, Peter; BRIX, Hans; VYMAZAL, Jan; DONG, Renjie. Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review. *Water Research*. 2014, vol. 57, p. 40-55. ISSN 0043-1354.

WU, Shubiao; WALLACE, Scott; BRIX, Hans; KUSCH, Peter; KIRUI, Wesley Kipkemoi; MASI, Fabio; DONG, Renjie. Treatment of industrial effluents in constructed wetlands: Challenges, operational strategies and overall performance. *Environmental Pollution*. 2015, vol. 201, p.107-120. ISSN 0269-7491.

WU, Haiming; ZHANG, Jian; NGO, Huu Hao; GUO, Wenshan; ZHEN, Hu; LIANG, Shuang; FAN, Jinlin; LIU, Hai. A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresource Technology*. 2015, vol. 175, p. 596-601. ISSN 0960-8524.

YADAV, Asheesh Kumar; DASH, Purnanjali; MOHANTY, Ayusman; ABBASI, Rouzbeh; MISHRA, Barada Kanta. Performance assessment of innovative constructed wetland-microbial fuel cell for electricity production and dye removal. *Ecological Engineering*. 2012, vol. 47, p. 126-131. ISSN 0925-8574.

YALCUK, Arda y UGURLU, Aysenur. Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment. *Bioresource Technology*. 2009, vol. 100, p. 2521–2526. ISSN 0960-8524.

ZAPATER-PEREYRA, M.; ILYAS, H.; LAVRNIC, S.; VAN BRUGGEN, J.J.A.; LENS, P.N.L. Evaluation of the performance and space requirement by three different hybrid constructed wetlands in a stack arrangement. *Ecological Engineering*. 2015, vol. 82, p. 290–300. ISSN 0925-8574.

ZHANG, Dong Qing; TAN, Soon Keat; GERSBERG, Richard M.; ZHU, Junfei; SADREDDINI, Sara; LI, Yifei. Nutrient removal in tropical subsurface flow constructed wetlands under batch and continuous flow conditions. *Journal of Environmental Management*. 2012, vol. 96 no.1, p. 1–6. ISSN 0301-4797.

ZHANG, Liang; ZHU, Xun; LI, Jun; LIAO, Qiang; YE, Dingding. Biofilm formation and electricity generation of a microbial fuel cell started up under different external resistances. *Journal of Power Sources*. 2011, vol. 196, p. 6029-6035. ISSN 0378-7753.

ZHAO, Yaqian; COLLUM, Sean; PHELAN, Mark; GOODBODY, Tristan; DOHERTY, Liam; HU, Yuansheng. Preliminary investigation of constructed wetland incorporating microbial fuel cell: batch and continuous flow trials. *Chemical Engineering Journal*. 2013, vol. 229, p. 364-370. ISSN 1385-8947.

ZHONG, Fei; WU, Juan; DAI, Yanran; CHENG, Shuiping; ZHANG, Zhaohui; JI, Hongjiu. Effects of front aeration on the purification process in horizontal subsurface flow constructed wetlands shown with 2D contour plots. *Ecological Engineering*. 2014, vol. 73, p. 699–704. ISSN 0925-8574.

ANEXOS

ANEXO A. PARÁMETROS MEDIDOS IN SITU

A.1 Temperatura

Tabla 7. Valores de Temperatura muestreo Fase I Carga 100 g DQO/m²-d

Fecha	Temperatura (°C)			
	Afluente	L1-Veg	L2-Veg	L3-Control
25/01/2016	24,2	23,8	23,8	23,9
02/02/2016	26,5	25,5	25,6	26,1
09/02/2016	25,6	24,5	24,5	25,2

Tabla 8. Valores de Temperatura muestreo Fase II- Carga 100 g DQO/m²-d

Fecha	Temperatura (°C)			
	Afluente	L1-Veg	L2-Veg	L3-Control
25/08/2016	25,5	24,1	24,3	23,6
31/08/2016	25,7	23,2	23,3	25,5
06/09/2016	25,1	23,5	23,7	24,5

Tabla 9. Valores de Temperatura muestreo Fase II- Carga 200 g DQO/m²-d

Fecha	Temperatura (°C)			
	Afluente	L1-Veg	L2-Veg	L3-Control
15/09/2016	25,4	25,9	26,1	26,3
20/09/2016	25,6	25,2	25,4	25,2
28/09/2016	26,2	24,9	24,5	26
06/10/2016	24,8	23,6	23,8	23,9

A.2 Oxígeno Disuelto

Tabla 10. Valores de Oxígeno Disuelto muestreo Fase I- Carga 100 g DQO/m²-d

Fecha	OD (mg/l)			
	Afluente	L1-Veg	L2-Veg	L3-Control
25/01/2016	8	2,5	2,7	1,2
02/02/2016	6,7	2,9	3	1,9
09/02/2016	7,2	2,3	2,5	1,7

Tabla 11. Valores de Oxígeno Disuelto muestreo Fase II- Carga 100 g DQO/m²-d

Fecha	OD (mg/l)			
	Afluente	L1-Veg	L2-Veg	L3-Control
25/08/2016	8,1	4,7	4,6	4,4
31/08/2016	8,5	4,6	4	3,7
06/09/2016	8,1	4,8	4	3,7

Tabla 12. Valores de Oxígeno Disuelto muestreo Fase II- Carga 200 g DQO/m²-d

Fecha	OD (mg/l)			
	Afluente	L1-Veg	L2-Veg	L3-Control
15/09/2016	7,7	5	3,9	3,3
20/09/2016	7,8	3,6	3,5	2,3
28/09/2016	7,8	3,2	3,8	2,2
06/10/2016	7,9	3,4	3,7	2,3

A.3 Potencial Redox

Tabla 13. Valores de Potencial Redox muestreo Fase I- Carga 100 g DQO/m²-d

Fecha	Eh (mV)			
	Afluente	L1-Veg	L2-Veg	L3-Control
25/01/2016	272	-236	-248	-241
02/02/2016	151	-215	-231	-241
09/02/2016	252	-250	-266	-248

Tabla 14. Valores de Potencial Redox muestreo Fase II- Carga 100 g DQO/m²-d

Fecha	Eh (mV)			
	Afluente	L1-Veg	L2-Veg	L3-Control
25/08/2016	280	35	36	24
31/08/2016	257	34	37	31
06/09/2016	231	52	35	14

Tabla 15. Valores de Potencial Redox muestreo Fase II- Carga 200 g DQO/m²-d

Fecha	Eh (mV)			
	Afluente	L1-Veg	L2-Veg	L3-Control
15/09/2016	216	79	81	70
20/09/2016	222	99	88	88
28/09/2016	231	97	83	76
06/10/2016	173	101	81	68

ANEXO B. RESULTADOS ANÁLISIS DE DQO

Tabla 16. Valores de DQO muestreo Fase I- Carga 100 g DQO/m²-d

Fecha	DQO (mg O ₂ /l)			
	Afluente	L1-Veg	L2-Veg	L3-Control
25/01/2016	272	-236	-248	-241
02/02/2016	151	-215	-231	-241
09/02/2016	252	-250	-266	-248

Tabla 17. Valores de DQO muestreo Fase II- Carga 100 g DQO/m²-d

Fecha	DQO (mg O ₂ /l)			
	Afluente	L1-Veg	L2-Veg	L3-Control
25/08/2016	280	35	36	24
31/08/2016	257	34	37	31
06/09/2016	231	52	35	14

Tabla 18. Valores de DQO muestreo Fase II- Carga 200 g DQO/m²-d

Fecha	DQO (mg O ₂ /l)			
	Afluente	L1-Veg	L2-Veg	L3-Control
15/09/2016	216	79	81	70
20/09/2016	222	99	88	88
28/09/2016	231	97	83	76
06/10/2016	173	101	81	68

ANEXO C. INFORMES DE ANÁLISIS DE LABORATORIO

Para el desarrollo de esta investigación se han utilizado solamente los valores correspondientes a la demanda química de oxígeno.

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 1 de 3	



"Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1111 de 2015, en los parámetros pH, DBO₅, DQO, SST, fenoles, SAAM, grasas y aceites en aguas, metales totales y disueltos en aguas, metales totales en suelos y toma de muestras puntuales y compuestas"



"Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 1615 de 2015 para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano"

Informe de resultados No.	I-16-021	Fecha de emisión:	Febrero 04 de 2016
Cliente:	ANGELICA CORZO HERNANDEZ		
Dirección del cliente:	Calle 53 No. 23-51		
Solicitud de servicio No.	16-010	No. de muestras:	04
Fecha de recepción de las muestras:	Enero 25 de 2016		
Muestras recibidas por:	Amparo López		
Fecha de análisis:	Enero 25 de 2016 – Febrero 04 de 2016		

1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-010-01	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	AFLUENTE		
Matriz de la muestra:	Agua Residual		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	UIS / CENTRO DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES		
Fecha del muestreo:	Enero 25 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	728	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	2	Gravimétrico / SM 2540 B
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	710	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	0,60	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (mg N/L)	2,83	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 2 de 3	

Informe de resultados No. I-16-021 Solicitud de servicio No. 16-010

2. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-010-02	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	EFLUENTE – L1		
Matriz de la muestra:	Agua Residual		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	UIS / CENTRO DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES		
Fecha del muestreo:	Enero 25 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	548	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	7	Gravimétrico / SM 2540 B
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	425	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	0,80	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (mg N/L)	3,23	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T

3. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-010-03	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	EFLUENTE – L2		
Matriz de la muestra:	Agua Residual		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	UIS / CENTRO DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES		
Fecha del muestreo:	Enero 25 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	544	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	8	Gravimétrico / SM 2540 B
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	580	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	0,74	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (mg N/L)	3,09	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469, 2463 ó 2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
labquimco@uis.edu.co
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/18 Página 3 de 3	

Informe de resultados No. I-16-021 Solicitud de servicio No. 16-010

4. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-010-04	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	EFLUENTE – L3		
Matriz de la muestra:	Agua Residual		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	UIS / CENTRO DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES		
Fecha del muestreo:	Enero 25 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	548	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	7	Gravimétrico / SM 2540 B
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	605	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	1,14	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (mg NL)	3,36	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T

Observaciones: Ninguna

Nota 1: Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

Nota 2: En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

Estimado cliente: Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comunique con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

Revisó y aprobó:

Luz Yolanda Vargas Fiallo
Directora del Laboratorio
Química. M.Sc Química UIS
MP PQ 1144

Elaboró: Amparo López Guerrero

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469, 2463 ó 2465. Telefax: (7) 6349009
Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
labquimco@uis.edu.co
Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUIMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 1 de 4	



Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1111 de 2015, en los parámetros pH, DBO₅, DQO, SST, fenoles, SAAM, grasas y aceites en aguas, metales totales y disueltos en aguas, metales totales en suelos y toma de muestras puntuales y compuestas



Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 1615 de 2015 para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano

Informe de resultados No.	I-16-028	Fecha de emisión:	Febrero 12 de 2016
Cliente:	ANGELICA CORZO HERNANDEZ		
Dirección del cliente:	Calle 53 No. 23-51		
Solicitud de servicio No.	16-023	No. de muestras:	04
Fecha de recepción de las muestras:	Febrero 02 de 2016		
Muestras recibidas por:	Amparo López		
Fecha de análisis:	Febrero 02 de 2016 – Febrero 12 de 2016		

1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-023-01	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	AFLUENTE		
Matriz de la muestra:	Agua Residual		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	UIS / CENTRO DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES		
Fecha del muestreo:	Febrero 02 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	666	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	86	Gravimétrico / SM 2540 B
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	676,8	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	350	Respirométrico / SM 5210 D
Nitrógeno Amoniacal (% N-NH ₃ /)	1,0	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (% N/L)	4,27	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T
Nitritos (mg NO ₂ /L)	0,291	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	0,349	Espectrofotométrico/RODIER
Fósforo Total (mg P/L)	3,51	Espectrofotométrico / SM 4500 P

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 2463 ó 2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/>, E-mail: labquimco@gmail.com; labquimco@uis.edu.co
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/18 Página 2 de 4	

Informe de resultados No. I-16-028 Solicitud de servicio No. 16-023

2. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 16-023-02	Tipo de muestra: Puntual
Identificación de la muestra: EFLUENTE – L1	
Matriz de la muestra: Agua Residual	
Muestreo realizado por: El Cliente	
Lugar y punto de muestreo: UIS / CENTRO DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	
Fecha del muestreo: Febrero 02 de 2016	

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	620	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	10	Gravimétrico / SM 2540 B
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	376	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	150	Respirométrico / SM 5210 D
Nitrógeno Amoniacal (% N-NH ₃ /L)	1,68	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (% N/L)	5,27	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T
Nitritos (mg NO ₂ /L)	0,050	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	0,149	Espectrofotométrico/RODIER
Fósforo Total (mg P/L)	1,56	Espectrofotométrico / SM 4500 P

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 2463 ó 2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/loci/> E-mail: labquimco@gmail.com
labquimco@uis.edu.co
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUIMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 3 de 4	

Informe de resultados No. I-16-028 Solicitud de servicio No. 16-023

3. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 16-023-03	Tipo de muestra: Puntual
Identificación de la muestra: EFLUENTE – L2	
Matriz de la muestra: Agua Residual	
Muestreo realizado por: El Cliente	
Lugar y punto de muestreo: UIS / CENTRO DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	
Fecha del muestreo: Febrero 02 de 2016	

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	716	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	6	Gravimétrico / SM 2540 B
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	526,4	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	200	Respirométrico / SM 5210 D
Nitrógeno Amoniacal (% N-NH ₃ /L)	1,28	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (% N/L)	5,55	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T
Nitritos (mg NO ₂ /L)	0,051	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	0,285	Espectrofotométrico/RODIER
Fósforo Total (mg P/L)	1,44	Espectrofotométrico / SM 4500 P

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 2463 ó 2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
labquimco@uis.edu.co
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 4 de 4	

Informe de resultados No. I-16- Solicitud de servicio No. 16-023

4. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 16-023-04	Tipo de muestra: Puntual
Identificación de la muestra: EFLUENTE – L3	
Matriz de la muestra: Agua Residual	
Muestreo realizado por: El Cliente	
Lugar y punto de muestreo: UIS / CENTRO DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	
Fecha del muestreo: Febrero 02 de 2016	

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	752	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	11	Gravimétrico / SM 2540 B
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	551,5	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	240	Respirométrico / SM 5210 D
Nitrógeno Amoniacal (% N-NH ₃ /L)	1,42	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (% N/L)	3,27	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T
Nitritos (mg NO ₂ /L)	0,075	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	0,236	Espectrofotométrico/RODIER
Fósforo Total (mg P/L)	1,26	Espectrofotométrico / SM 4500 P

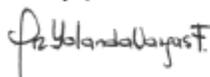
Observaciones: Ninguna

Nota 1: Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

Nota 2: En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

Estimado cliente: Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comunice con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

Revisó y aprobó:



Luz Yolanda Vargas Fiallo
Directora del Laboratorio
Química. M.Sc Química UIS
MP PQ 1144

Elaboró: Amparo López Guerrero

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
Conmutador: (7) 6344000 Ext. 2463 ó 2465. Telefax: (7) 6349009
Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
labquimco@uis.edu.co
Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUIMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 1 de 3	



"Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1111 de 2015, en los parámetros pH, DBO₅, DQO, SST, fenoles, SAAM, grasas y aceites en aguas, metales totales y disueltos en aguas, metales totales en suelos y toma de muestras puntuales y compuestas"



"Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 1615 de 2015 para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano"

Informe de resultados No.	I-16-042	Fecha de emisión:	Febrero 19 de 2016
Cliente:	ANGELICA CORZO HERNANDEZ		
Dirección del cliente:	Calle 53 No. 23-51		
Solicitud de servicio No.	16-038	No. de muestras:	04
Fecha de recepción de las muestras:	Febrero 09 de 2016		
Muestras recibidas por:	Amparo López		
Fecha de análisis:	Febrero 09 de 2016 - Febrero 19 de 2016		

1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-038-01	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	AFLUENTE		
Matriz de la muestra:	Agua Residual		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	UIS / CENTRO DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES		
Fecha del muestreo:	Febrero 09 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	736	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendedos Totales (mg /L)	10	Gravimétrico / SM 2540 B
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	470	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble (mg O ₂ /L)	250.7	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Nitrógeno Amoniacal (mgN-NH ₃ /L)	1,42	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 2 de 3	

Informe de resultados No. I-16-042 Solicitud de servicio No. 16-038

2. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 16-038-02	Tipo de muestra: Puntual
Identificación de la muestra: EFLUENTE – L1	
Matriz de la muestra: Agua Residual	
Muestreo realizado por: El Cliente	
Lugar y punto de muestreo: UIS / CENTRO DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	
Fecha del muestreo: Febrero 09 de 2016	

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	568	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	4	Gravimétrico / SM 2540 B
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	75,2	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble (mg O ₂ /L)	62,7	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	1,71	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃

3. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 16-038-03	Tipo de muestra: Puntual
Identificación de la muestra: EFLUENTE – L2	
Matriz de la muestra: Agua Residual	
Muestreo realizado por: El Cliente	
Lugar y punto de muestreo: UIS / CENTRO DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	
Fecha del muestreo: Febrero 09 de 2016	

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	664	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	32	Gravimétrico / SM 2540 B
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	225,6	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble (mg O ₂ /L)	125,3	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	1,78	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 2463 ó 2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
labquimco@uis.edu.co
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALÍTICO	Versión: 05	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2012/01/16 Página 3 de 3	

Informe de resultados No. I-16-042 Solicitud de servicio No. 16-038

4. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 16-038-04	Tipo de muestra: Puntual
Identificación de la muestra: EFLUENTE – L3	
Matriz de la muestra: Agua Residual	
Muestreo realizado por: El Cliente	
Lugar y punto de muestreo: UIS / CENTRO DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	
Fecha del muestreo: Febrero 09 de 2016	

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	588	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	4	Gravimétrico / SM 2540 B
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	112,8	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble (mg O ₂ /L)	100,3	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Nitrógeno Amoniacal (% N-NH ₃)	1,78	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃

Observaciones: Ninguna

Nota 1: Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

Nota 2: En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

Estimado cliente: Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comunique con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

Revisó y aprobó:



Luz Yolanda Vargas Fiallo
Directora del Laboratorio
Química. M.Sc Química UIS
MP PQ 1144

Elaboró: Amparo López Guerrero

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
Conmutador: (7) 6344000 Ext. 2463 ó 2465. Telefax: (7) 6349009
Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
labquimco@uis.edu.co
Bucaramanga - Colombia

MUESTREO FASE II

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 08	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/08/08	
		Página 1 de 5	



"Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1111 de 2015 y Resolución 0921 de 2016, en los parámetros pH, DBO₅, DQO, SST, fenoles, SAAM, grasas y aceites, hidrocarburos en aguas, metales totales y disueltos en aguas, pH y metales totales en suelos, TCLP en residuos peligrosos y toma de muestras puntuales y compuestas"



"Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 1615 de 2015, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano"

Informe de resultados No.	I-16-399	Fecha de emisión:	Septiembre 02 de 2016
Cliente:	ANGELICA CORZO HERNANDEZ		
Dirección del cliente:	Calle 53 No. 23-51		
Solicitud de servicio No.	16-348	No. de muestras:	04
Fecha de recepción de las muestras:	Agosto 25 de 2016		
Muestras recibidas por:	Amparo López		
Fecha de análisis:	Agosto 25 de 2016 – Septiembre 02 de 2016		

1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-348-01	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	AFLUENTE		
Matriz de la muestra:	Agua Residual Superficial		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Agosto 25 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	7,2	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendedos Totales (mg /L)	2	Gravimétrico / SM 2540 B
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	240	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	442,2	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble	337,7	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	11,34	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (mg N/L)	16,01	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T
Nitritos (mg NO ₂ /L)	0,009	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	2,30	Espectrofotométrico/RODIER
Fósforo Total (mg P/L)	2,21	Espectrofotométrico / SM 4500 P

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 2 de 5	

Informe de resultados No. I-16-399 Solicitud de servicio No. 16-348

2. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 16-348-02	Tipo de muestra: Puntual
Identificación de la muestra: EFLUENTE – L 1	
Matriz de la muestra: Agua Residual	
Muestreo realizado por: El Cliente	
Lugar y punto de muestreo: Centro Caracterización de Materiales	
Fecha del muestreo: Agosto 25 de 2016	

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	456	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendedos Totales (mg /L)	4	Gravimétrico / SM 2540 B
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	170	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	385,9	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble	241,2	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	4,00	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (mg NL)	8,00	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T
Nitritos (mg NO ₂ /L)	0,016	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	0,102	Espectrofotométrico/RODIER
Fósforo Total (mg P/L)	2,28	Espectrofotométrico / SM 4500 P

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 3 de 5	

Informe de resultados No. I-16-399 Solicitud de servicio No. 16-348

3. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-348-03	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	EFLUENTE – L 2		
Matriz de la muestra:	Agua Residual Superficial		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Agosto 25 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	496	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendedos Totales (mg /L)	10	Gravimétrico / SM 2540 B
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	140	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	225,1	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble	209,0	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	2,01	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (mg NL)	6,00	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T
Nitritos (mg NO ₂ /L)	0,015	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	0,387	Espectrofotométrico/RODIER
Fósforo Total (mg P/L)	1,85	Espectrofotométrico / SM 4500 P

	LABORATORIO QUIMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 4 de 5	

Informe de resultados No. I-16-399 Solicitud de servicio No. 16-348

4. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-348-04	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	EFLUENTE – L 4		
Matriz de la muestra:	Agua Residual Superficial		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Agosto 25 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	440	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	6	Gravimétrico / SM 2540 B
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	150	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	257,3	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble	193,0	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	2,01	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (mg N/L)	3,33	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T
Nitritos (mg NO ₂ ⁻ /L)	0,03	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ ⁻ B
Nitratos (mg NO ₃ ⁻ /L)	0,29	Espectrofotométrico/RODIER
Fósforo Total (mg P/L)	3,69	Espectrofotométrico / SM 4500 P

Observaciones: Ninguna

Nota 1: Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

Nota 2: En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

Estimado cliente: Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comunique con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465, Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 5 de 5	

Informe de resultados No. I-16-399 Solicitud de servicio No. 16-348

Revisó y aprobó:

Luz Yolanda Vargas Fiallo

Luz Yolanda Vargas Fiallo
Directora del Laboratorio
Química. Msc Química UIS
MP PQ 1144

Elaboró: Amparo López G

	LABORATORIO QUIMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 1 de 5	



"Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1111 de 2015 y Resolución 0921 de 2016, en los parámetros pH, DBO₅, DCO, SST, fenoles, SAAM, grasas y aceites, hidrocarburos en aguas, metales totales y disueltos en aguas, pH y metales totales en suelos, TCLP en residuos peligrosos y toma de muestras puntuales y compuestas"



"Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 1615 de 2015, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano"

Informe de resultados No.	I-16-410	Fecha de emisión:	Septiembre 09 de 2016
Cliente:	ANGELICA CORZO HERNANDEZ		
Dirección del cliente:	Calle 53 No. 23-51		
Solicitud de servicio No.	16-365	No. de muestras:	04
Fecha de recepción de las muestras:	Agosto 31 de 2016		
Muestras recibidas por:	Amparo López		
Fecha de análisis:	Agosto 31 de 2016 – Septiembre 09 de 2016		

1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-365-01	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	AFLUENTE		
Matriz de la muestra:	Agua Residual Superficial		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Agosto 31 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	736	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	2	Gravimétrico / SM 2540 B
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	10,67	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (mg NL)	15,34	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T
Nitritos (mg NO ₂ /L)	0,085	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	243	Espectrofotométrico/RODIER
Fósforo Total (mg P/L)	3,5	Espectrofotométrico / SM 4500 P
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	280	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	510,3	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble	421,2	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 2 de 5	

Informe de resultados No. I-16-410 Solicitud de servicio No. 16-365

2. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 16-365-02	Tipo de muestra: Puntual
Identificación de la muestra: EFLUENTE – L 1	
Matriz de la muestra: Agua Residual	
Muestreo realizado por: El Cliente	
Lugar y punto de muestreo: Centro Caracterización de Materiales	
Fecha del muestreo: Agosto 31 de 2016	

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	476	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	6	Gravimétrico / SM 2540 B
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	3,33	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (mg N/L)	8,00	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T
Nitritos (mg NO ₂ /L)	0,045	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	0,13	Espectrofotométrico/RODIER
Fósforo Total (mg P/L)	2,55	Espectrofotométrico / SM 4500 P
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	140	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	259,2	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble	162,0	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUIMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 3 de 5	

Informe de resultados No. I-16-410 Solicitud de servicio No. 16-365

3. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-365-03	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	EFLUENTE – L 2		
Matriz de la muestra:	Agua Residual Superficial		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Agosto 31 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	500	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	9	Gravimétrico / SM 2540 B
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	2,64	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (mg N/L)	7,34	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T
Nitritos (mg NO ₂ /L)	0,043	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	0,13	Espectrofotométrico/RODIER
Fósforo Total (mg P/L)	4,85	Espectrofotométrico / SM 4500 P
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	160	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	291,6	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble	210,6	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUIMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 4 de 5	

Informe de resultados No. I-16-410 Solicitud de servicio No. 16-365

4. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-365-04	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	EFLUENTE – L 4		
Matriz de la muestra:	Agua Residual Superficial		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Agosto 31 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	516	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	18	Gravimétrico / SM 2540 B
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	2,00	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (mg NL)	8,00	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T
Nitritos (mg NO ₂ /L)	0,04	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	0,13	Espectrofotométrico/RODIER
Fósforo Total (mg P/L)	6,8	Espectrofotométrico / SM 4500 P
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	130	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	226,8	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble	145,8	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C

Observaciones: Ninguna

Nota 1: Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

Nota 2: En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

Estimado cliente: Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comunique con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUIMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 08	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 5 de 5	

Informe de resultados No. I-16-410

Solicitud de servicio No. 16-365

Revisó y aprobó:



Luz Yolanda Vargas Fiallo
Directora del Laboratorio
Química. Msc Química UIS
MP PQ 1144

Elaboró: Amparo López G

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 1 de 5	



"Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1111 de 2015 y Resolución 0921 de 2016, en los parámetros pH, DBO₅, DCO, SST, fenoles, SAAM, grasas y aceites, hidrocarburos en aguas, metales totales y disueltos en aguas, pH y metales totales en suelos, TCLP en residuos peligrosos y toma de muestras puntuales y compuestas"



"Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 1615 de 2015, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano"

Informe de resultados No.	I-16-416	Fecha de emisión:	Septiembre 23 de 2016
Cliente:	ANGELICA CORZO HERNANDEZ		
Dirección del cliente:	Calle 53 No. 23-51		
Solicitud de servicio No.	16-375	No. de muestras:	04
Fecha de recepción de las muestras:	Septiembre 06 de 2016		
Muestras recibidas por:	Amparo López		
Fecha de análisis:	Septiembre 07 de 2016 – Septiembre 23 de 2016		

1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-375-01	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	AFLUENTE		
Matriz de la muestra:	Agua Residual Superficial		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Septiembre 06 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	820	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	2	Gravimétrico / SM 2540 B
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	9,86	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (mg NL)	21,34	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T
Nitritos (mg NO ₂ /NL)	0,0304	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	2,06	Espectrofotométrico/RODIER
Fósforo Total (mg P/L)	1,65	Espectrofotométrico / SM 4500 P
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	420	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	745,2	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble (mg O ₂ /L)	631,8	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 2 de 5	

Informe de resultados No. I-16-416 Solicitud de servicio No. 16-375

2. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-375-02	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	EFLUENTE – L 1		
Matriz de la muestra:	Agua Residual		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Septiembre 06 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	568	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	6	Gravimétrico / SM 2540 B
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	3,48	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (mg NL)	13,34	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T
Nitritos (mg NO ₂ /NL)	0,012	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	<0,1	Espectrofotométrico/RODIER
Fósforo Total (mg P/L)	1,69	Espectrofotométrico / SM 4500 P
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	200	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	356,4	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble (mg O ₂ /L)	259,2	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 3 de 5	

Informe de resultados No. I-16-416 Solicitud de servicio No. 16-375

3. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 16-375-03	Tipo de muestra: Puntual
Identificación de la muestra: EFLUENTE – L 2	
Matriz de la muestra: Agua Residual Superficial	
Muestreo realizado por: El Cliente	
Lugar y punto de muestreo: Centro Caracterización de Materiales	
Fecha del muestreo: Septiembre 06 de 2016	

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	540	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	3	Gravimétrico / SM 2540 B
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	4,06	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (mg N/L)	12,67	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T
Nitritos (mg NO ₂ /N/L)	0,012	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	<0,1	Espectrofotométrico/RODIER
Fósforo Total (mg P/L)	2,36	Espectrofotométrico / SM 4500 P
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	180	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	324,0	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble (mg O ₂ /L)	178,2	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/08/08 Página 4 de 5	

Informe de resultados No. I-16-416 Solicitud de servicio No. 16-375

4. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 16-375-04	Tipo de muestra: Puntual
Identificación de la muestra: EFLUENTE – L 4	
Matriz de la muestra: Agua Residual Superficial	
Muestreo realizado por: El Cliente	
Lugar y punto de muestreo: Centro Caracterización de Materiales	
Fecha del muestreo: Septiembre 08 de 2016	

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	552	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendedos Totales (mg /L)	3	Gravimétrico / SM 2540 B
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	3,48	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (mg N/L)	13,34	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T
Nitritos (mg NO ₂ /NL)	0,079	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	0,12	Espectrofotométrico/RODIER
Fósforo Total (mg P/L)	1,59	Espectrofotométrico / SM 4500 P
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	215	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	380,7	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble (mg O ₂ /L)	243,0	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C

Observaciones: Ninguna

Nota 1: Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

Nota 2: En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

Estimado cliente: Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comunique con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUIMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 08	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 5 de 5	

Informe de resultados No. I-16-416 Solicitud de servicio No. 16-375

Revisó y aprobó:



Luz Yolanda Vargas Fiallo
Directora del Laboratorio
Química. Msc Química UIS
MP PQ 1144

Elaboró: Amparo López G

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 1 de 3	



"Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1111 de 2015 y Resolución 0921 de 2016, en los parámetros pH, DBO₅, DCO, SST, fenoles, SAAM, grasas y aceites, hidrocarburos en aguas, metales totales y disueltos en aguas, pH y metales totales en suelos, TCLP en residuos peligrosos y toma de muestras puntuales y compuestas"



"Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 1615 de 2015, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano"

Informe de resultados No.	I-16-427	Fecha de emisión:	Septiembre 23 de 2016
Cliente:	ANGELICA CORZO HERNANDEZ		
Dirección del cliente:	Calle 53 No. 23-51		
Solicitud de servicio No.	16-391	No. de muestras:	04
Fecha de recepción de las muestras:	Septiembre 16 de 2016		
Muestras recibidas por:	Amparo López		
Fecha de análisis:	Septiembre 17 de 2016 – Septiembre 23 de 2016		

1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-391-01	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	AFLUENTE		
Matriz de la muestra:	Agua Residual Superficial		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Septiembre 16 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	1296	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendedos Totales (mg /L)	1	Gravimétrico / SM 2540 B
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	19,72	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	1004,4	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble	737,1	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	625	Respirométrico / SM 5210 D

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/08/08 Página 2 de 3	

Informe de resultados No. I-16-427 Solicitud de servicio No. 16-391

2. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-391-02	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	EFLUENTE – L 1		
Matriz de la muestra:	Agua Residual		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Septiembre 16 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	964	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	5	Gravimétrico / SM 2540 B
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	3,77	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	793,8	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble	648,0	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	440	Respirométrico / SM 5210 D

3. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-391-03	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	EFLUENTE – L 2		
Matriz de la muestra:	Agua Residual		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Septiembre 16 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	976	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	5	Gravimétrico / SM 2540 B
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	4,29	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	777,6	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble	615,6	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	380	Respirométrico / SM 5210 D

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 3 de 3	

Informe de resultados No. I-16-427 Solicitud de servicio No. 16-391

4. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-391-04	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	EFLUENTE – L 3		
Matriz de la muestra:	Agua Residual		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Septiembre 16 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	948	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	3	Gravimétrico / SM 2540 B
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	3,89	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	874,8	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble	664,2	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	400	Respirométrico / SM 5210 D

Observaciones: Ninguna

Nota 1: Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

Nota 2: En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

Estimado cliente: Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comunique con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

Revisó y aprobó:



Luz Yolanda Vargas Fiallo
Directora del Laboratorio
Química. Msc Química UIS
MP PQ 1144

Elaboró: Amparo López G

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 08	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/08/08	
		Página 1 de 3	



"Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1111 de 2015 y Resolución 0921 de 2016, en los parámetros pH, DBO₅, DQO, SST, fenoles, SAAM, grasas y aceites, hidrocarburos en aguas, metales totales y disueltos en aguas, pH y metales totales en suelos, TCLP en residuos peligrosos y toma de muestras puntuales y compuestas"



"Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 1615 de 2015, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano"

Informe de resultados No.	I-16-445	Fecha de emisión:	Septiembre 29 de 2016
Cliente:	ANGELICA CORZO HERNANDEZ		
Dirección del cliente:	Calle 53 No. 23-51		
Solicitud de servicio No.	16-402	No. de muestras:	04
Fecha de recepción de las muestras:	Septiembre 20 de 2016		
Muestras recibidas por:	Amparo López		
Fecha de análisis:	Septiembre 20 de 2016 – Septiembre 29 de 2016		

1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-402-01	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	AFLUENTE		
Matriz de la muestra:	Agua Residual Superficial		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Septiembre 20 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	1128	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	5	Gravimétrico / SM 2540 B
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	20,3	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	1393,2	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble (mg O ₂ /L)	907,2	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	900	Respirométrico / SM 5210 D

Ciudad Universitaria Carrera 77 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 2 de 3	

Informe de resultados No. I-16-445 Solicitud de servicio No. 16-402

2. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-402-02	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	EFLUENTE – L 1		
Matriz de la muestra:	Agua Residual		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Septiembre 20 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	500	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	11	Gravimétrico / SM 2540 B
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	5,22	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	429,3	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble (mg O ₂ /L)	372,6	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	280	Respirométrico / SM 5210 D

3. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-402-03	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	EFLUENTE – L 2		
Matriz de la muestra:	Agua Residual		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Septiembre 20 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	720	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	13	Gravimétrico / SM 2540 B
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	10,44	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	583,2	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble (mg O ₂ /L)	486	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	380	Respirométrico / SM 5210 D

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 3 de 3	

Informe de resultados No. I-16-445 Solicitud de servicio No. 16-402

4. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 16-402-04	Tipo de muestra: Puntual
Identificación de la muestra: EFLUENTE – L 3	
Matriz de la muestra: Agua Residual	
Muestreo realizado por: El Cliente	
Lugar y punto de muestreo: Centro Caracterización de Materiales	
Fecha del muestreo: Septiembre 20 de 2016	

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	788	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	5	Gravimétrico / SM 2540 B
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	13,34	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	696,6	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble (mg O ₂ /L)	599,4	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	460	Respirométrico / SM 5210 D

Observaciones: Ninguna

Nota 1: Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

Nota 2: En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

Estimado cliente: Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comunique con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

Revisó y aprobó:



Luz Yolanda Vargas Fiallo
Directora del Laboratorio
Química. Msc Química UIS
MP PQ 1144

Elaboró: Amparo López G

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUIMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 1 de 3	



"Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1111 de 2015 y Resolución 0921 de 2016, en los parámetros pH, DBO₅, DCO, SST, fenoles, SAAM, grasas y aceites, hidrocarburos en aguas, metales totales y disueltos en aguas, pH y metales totales en suelos, TCLP en residuos peligrosos y toma de muestras puntuales y compuestas"



"Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 1615 de 2015, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano"

Informe de resultados No.	I-16-464	Fecha de emisión:	Octubre 10 de 2016
Cliente:	ANGELICA CORZO HERNANDEZ		
Dirección del cliente:	Calle 53 No. 23-51		
Solicitud de servicio No.	16-423	No. de muestras:	04
Fecha de recepción de las muestras:	Septiembre 29 de 2016		
Muestras recibidas por:	Amparo López		
Fecha de análisis:	Septiembre 29 de 2016 – Octubre 10 de 2016		

1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-423-01	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	AFLUENTE		
Matriz de la muestra:	Agua Residual Superficial		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Septiembre 29 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	1496	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendedos Totales (mg /L)	4	Gravimétrico / SM 2540 B
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	19,14	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	1296	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble	607,5	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 2 de 3	

Informe de resultados No. I-16-464 Solicitud de servicio No. 16-423

2. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-423-02	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	EFLUENTE – L 1		
Matriz de la muestra:	Agua Residual		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Septiembre 29 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	632	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	4	Gravimétrico / SM 2540 B
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	4,06	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	356,4	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble	210,6	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C

3. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-423-03	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	EFLUENTE – L 2		
Matriz de la muestra:	Agua Residual		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Septiembre 29 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	692	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	5	Gravimétrico / SM 2540 B
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	5,8	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	486	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble	307,8	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/08/08 Página 3 de 3	

Informe de resultados No. I-16-464 Solicitud de servicio No. 16-423

4. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-423-04	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	EFLUENTE – L 3		
Matriz de la muestra:	Agua Residual		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Septiembre 29 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	748	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendedos Totales (mg /L)	4	Gravimétrico / SM 2540 B
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	8,12	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	460,8	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble	405	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C

Observaciones: Ninguna

Nota 1: Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

Nota 2: En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

Estimado cliente: Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comuniquen con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

Revisó y aprobó:



Luz Yolanda Vargas Fiallo
Directora del Laboratorio
Química. Msc Química UIS
MP PQ 1144

Elaboró: Amparo López G

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/laci/> E-mail: labquimco@gmail.com
Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUIMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08	
		Página 1 de 5	



"Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1111 de 2015 y Resolución 0921 de 2016, en los parámetros pH, DBO₅, DOO, SST, fenoles, SAAM, grasas y aceites, hidrocarburos en aguas, metales totales y disueltos en aguas, pH y metales totales en suelos, TCLP en residuos peligrosos y toma de muestras puntuales y compuestas"



"Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 1615 de 2015, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano"

Informe de resultados No.	I-16-483	Fecha de emisión:	Octubre 14 de 2016
Cliente:	ANGELICA CORZO HERNANDEZ		
Dirección del cliente:	Calle 53 No. 23-51		
Solicitud de servicio No.	16-437	No. de muestras:	04
Fecha de recepción de las muestras:	Octubre 06 de 2016		
Muestras recibidas por:	Amparo López		
Fecha de análisis:	Octubre 06 de 2016 – Octubre 14 de 2016		

1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-437-01	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	AFLUENTE		
Matriz de la muestra:	Agua Residual Superficial		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Octubre 06 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	1144	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	4	Gravimétrico / SM 2540 B
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	850	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	1360,8	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble (mg O ₂ /L)	1069,2	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	12,18	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (mg N/L)	21,46	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T
Nitritos (mg NO ₂ /L)	0,018	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	2,81	Espectrofotométrico/RODIER
Fósforo Total (mg P/L)	4,47	Espectrofotométrico / SM 4500 P

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 2 de 5	

Informe de resultados No. I-16-483

Solicitud de servicio No. 16-437

2. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 16-437-02	Tipo de muestra: Puntual
Identificación de la muestra: EFLUENTE – L 1	
Matriz de la muestra: Agua Residual	
Muestreo realizado por: El Cliente	
Lugar y punto de muestreo: Centro Caracterización de Materiales	
Fecha del muestreo: Octubre 06 de 2016	

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	420	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendidos Totales (mg /L)	5	Gravimétrico / SM 2540 B
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	300	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	453,6	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble (mg O ₂ /L)	388,8	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	5,80	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (mg N/L)	12,18	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T
Nitritos (mg NO ₂ /L)	0,014	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	<0,05	Espectrofotométrico/RODIER
Fósforo Total (mg P/L)	4,57	Espectrofotométrico / SM 4500 P

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUIMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 3 de 5	

Informe de resultados No. I-16-483 Solicitud de servicio No. 16-437

3. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 16-437-03	Tipo de muestra: Puntual
Identificación de la muestra: EFLUENTE – L 2	
Matriz de la muestra: Agua Residual Superficial	
Muestreo realizado por: El Cliente	
Lugar y punto de muestreo: Centro Caracterización de Materiales	
Fecha del muestreo: Octubre 08 de 2016	

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	592	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendedos Totales (mg /L)	3	Gravimétrico / SM 2540 B
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	340	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	567	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble (mg O ₂ /L)	529,2	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	9,28	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (mg NL)	13,92	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T
Nitritos (mg NO ₂ /L)	0,011	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	<0,05	Espectrofotométrico/RODIER
Fósforo Total (mg P/L)	3,67	Espectrofotométrico / SM 4500 P

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/laci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 4 de 5	

Informe de resultados No. I-16-483 Solicitud de servicio No. 16-437

4. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	16-437-04	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	EFLUENTE – L 4		
Matriz de la muestra:	Agua Residual Superficial		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Centro Caracterización de Materiales		
Fecha del muestreo:	Octubre 06 de 2016		

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO/ NORMA
Sólidos Totales (mg/L)	560	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Suspendedos Totales (mg /L)	7	Gravimétrico / SM 2540 B
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	360	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	550,8	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Demanda Química de Oxígeno Soluble (mg O ₂ /L)	517,4	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₃ /L)	5,22	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total (mg N/L)	12,76	Titrimétrico -Kjeldahl / SM 4500 N _T
Nitritos (mg NO ₂ /L)	0,023	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	<0,05	Espectrofotométrico/RODIER
Fósforo Total (mg P/L)	4,4	Espectrofotométrico / SM 4500 P

Observaciones: Ninguna

Nota 1: Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

Nota 2: En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUIMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 06	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2016/06/08 Página 5 de 5	

Informe de resultados No. I-16-483 Solicitud de servicio No. 16-437

Estimado cliente: Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comunique con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

Revisó y aprobó:



Luz Yolanda Vargas Fiallo
Directora del Laboratorio
Química. Msc Química UIS
MP PQ 1144

Elaboró: Amparo López G

ANEXO D. DATOS SEGUIMIENTO DIARIO VOLTAJE

Tabla 19. Voltaje diario Fase I-Carga 100 g DQO/m²-d

Fecha	L1-Veg	L2-Veg	L3-Control
16/12/2015	1,3	2,1	2,1
18/12/2015	1,2	1,4	2,3
19/12/2015	1,4	2,3	2
20/12/2015	1,1	1,7	2,1
21/12/2015	1,2	1,5	2,5
22/12/2015	1	3,1	2,4
23/12/2015	1,1	2,7	2,4
24/12/2015	3,9	3	4,3
26/12/2015	0,8	1,7	1,5
27/12/2015	1,1	2	4,5
28/12/2015	1,5	1,8	2,4
29/12/2015	1,7	1,5	7,4
30/12/2015	6,9	0,9	8,4
31/12/2015	5,1	1,3	4
02/01/2016	3,5	1,1	3,7
03/01/2016	4,1	2,2	4,7
04/01/2016	4,5	2,8	14,9
05/01/2016	4,4	2,5	4,5
06/01/2016	4,5	2,1	3,8
07/01/2016	4,3	29,2	11,9
08/01/2016	5,4	20,7	5,7
09/01/2016	89,8	8,5	12,8
10/01/2016	5,2	4,5	12,5
11/01/2016	4,5	4,8	12,7
12/01/2016	3,4	7,2	6,3
13/01/2016	5,6	70,7	10,7
14/01/2016	2,1	60,8	3,5
15/01/2016	4,5	78	5,4
16/01/2016	43,7	20,4	3,4
17/01/2016	41	8,7	3,5
18/01/2016	42,9	9,1	3,8
19/01/2016	49,9	10,1	2,8
20/01/2016	68,5	53,2	3
21/01/2016	47,8	13,9	4,6
22/01/2016	42,8	10,8	3,2
24/01/2016	53,2	48,1	4,2

Fecha	L1-Veg	L2-Veg	L3-Control
26/01/2016	38,3	39,3	3,1
27/01/2016	47,5	41,3	4,5
28/01/2016	57,3	35,2	4,7
29/01/2016	40,9	27,5	3,4
30/01/2016	45,1	29,7	4,6
31/01/2016	47,9	17,9	1,4
01/02/2016	31,1	26,7	1,5
02/02/2016	12,5	44,1	1,8
Mediana (mV)	4,8	7,9	3,8
Desviación	23,77	20,73	3,46

Tabla 20. Voltaje diario Fase II-Carga 100 y 200 g DQO/m²-d

Fecha	L1-Veg	L2-Veg	L3-Control
25/07/2016	0,6	0,2	0,2
26/07/2016	0,4	0,2	0,2
27/07/2016	0,2	0,8	0,1
28/07/2016	0,4	1,2	0,1
29/07/2016	0,4	1,4	0,1
30/07/2016	0,7	1,1	0,1
31/07/2016	0,5	1,6	0,1
01/08/2016	0,4	1,5	0,4
02/08/2016	0,8	1,9	0,4
03/08/2016	1,1	3,7	0,4
04/08/2016	1,7	5,9	0,1
05/08/2016	1,5	6,2	0,1
06/08/2016	4,3	4,6	0,1
07/08/2016	1,8	5,8	0,3
08/08/2016	2,7	6,7	0,1
09/08/2016	2,2	7,3	0,1
10/08/2016	1,6	11,1	0,1
11/08/2016	2,9	12,9	0,2
12/08/2016	3,3	8,6	0,6
13/08/2016	3,1	7,4	1,5
14/08/2016	2,4	10,2	4,7
15/08/2016	3,4	9,1	6,2
16/08/2016	5,8	17,5	5,8
17/08/2016	6,2	13,9	3,3
18/08/2016	5,3	36,7	9,7

Fecha	L1-Veg	L2-Veg	L3-Control
19/08/2016	8,6	18,5	2,1
20/08/2016	58,5	9,4	4,6
21/08/2016	22,2	32,8	3,8
22/08/2016	34,7	12,6	2,5
23/08/2016	2,5	29,3	0,6
24/08/2016	8,8	17,6	0,7
25/08/2016	7,3	5,2	0,9
26/08/2016	19,1	4,7	0,9
27/08/2016	8,6	6,3	1,2
28/08/2016	3,1	8,1	2,7
29/08/2016	4,1	10,8	1,4
30/08/2016	4,8	9,8	1,6
31/08/2016	7,3	13,6	3,2
01/09/2016	4,1	14,2	3,5
02/09/2016	16,2	24,6	1,9
03/09/2016	8,1	50,1	1,5
04/09/2016	23,9	39,3	4,1
05/09/2016	15,4	25,4	8,6
06/09/2016	16,7	11,9	9,3
07/09/2016	12,5	33,5	5,4
08/09/2016	11,7	29,7	6,7
09/09/2016	7,7	16,9	5,9
10/09/2016	8,2	12,4	5,6
11/09/2016	10,1	45,9	6,1
12/09/2016	29,6	23,1	2,9
13/09/2016	17,2	91,6	1,6
14/09/2016	9,5	52,4	1,2
15/09/2016	10,1	31,2	2,7
16/09/2016	14,9	26,9	3,3
17/09/2016	10,8	32,4	7,4
18/09/2016	12,7	30,7	10,5
19/09/2016	11,2	17,5	13,9
20/09/2016	9,9	43,6	11,6
21/09/2016	11,4	58,2	9,8
22/09/2016	10,5	46,3	7,2
23/09/2016	12,3	39,6	5,1
24/09/2016	27,8	28,4	6,8
25/09/2016	11,7	31,7	6,3
26/09/2016	14,8	17,3	7,6
27/09/2016	22,9	34,1	8,4

Fecha	L1-Veg	L2-Veg	L3-Control
28/09/2016	18,8	23,7	9,2
Mediana (mV)	7,9	13,8	2,6
Desviación (mV)	9,93	17,37	3,52