

**PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE LA BIODEGRADACIÓN DE
MATERIA ORGÁNICA PRESENTE EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS
MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE
MICROBIANA**

**LUIS MIGUEL LUNA CASTRO
YOSELIN SARAY PEREZ MEJIA**

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
VALLEDUPAR-CESAR
2019**

**PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE LA BIODEGRADACIÓN DE
MATERIA ORGÁNICA PRESENTE EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS
MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE
MICROBIANA**

**LUIS MIGUEL LUNA CASTRO
YOSELIN SARAY PEREZ MEJIA**

**PROYECTO DE GRADO
DIRECTOR(A): SANDRA MILENA RODRIGUEZ PUERTA
Msc. Microbiología
CODIRECTORES:
WALNER LOPEZ MENA
ANGEL DAVID POLO CORDOBA**

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
VALLEDUPAR-CESAR**

2019

Nota de Aceptación

Jurado

Jurado

AGRADECIMIENTOS

A Dios primeramente por permitir realizar este proyecto, por entregarnos sabiduría, paciencia, dedicación y compromiso. A mis padres, Yíscar y Karelis, un pilar fundamental en mi vida, sin ustedes no hubiese sido posible este sueño ya hecho realidad, por cada uno de sus esfuerzos y sacrificios para poder culminar mi carrera, por sus enseñanzas y su paciencia durante toda mi vida y a toda mi familia por todo el apoyo brindado.

A mi compañero de proyecto, Luna, por su tenacidad y empeño, por cada una de las aventuras vividas en este camino juntos, los extrañare. A Rafael, un apoyo incondicional en este proceso, por su paciencia y su entendimiento en todo momento.

A nuestra Directora, Sandra y nuestros codirectores Walner y Angel, por su apoyo y sus aportes, fueron fundamentales en nuestra investigación, ¡muchas gracias!

A mis amigos por su ayuda continua y su cooperación durante toda nuestra preparación y desarrollo de la investigación y a todas aquellas personas que fueron vitales para el desarrollo la misma, agradecimientos absolutos.

Yoselin Perez

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por caminar siempre a mi lado en este largo camino.

A mis padres Emilton, y Luz Mery, que desde antes de mi nacimiento estuvieron conmigo, me levantaron cada vez que caí y sus consejos me guiaron en las épocas más duras de mi vida, que depositaron su confianza en mi y dieron todo de si para que hoy sea lo que soy. Más que míos, lo que llegue a lograr en esta vida es suyo. GRACIAS! A mis hermanas Paola, por tu apoyo incondicional y tus consejos, Roxana, por las mil sonrisas que compartimos y Maryori, por a pesar de mis años permitirme volver a ser niño. Por ser mi motor y fuente de inspiración para nunca rendirme. GRACIAS!

A mi compañera de tesis Yoselin, por acompañarme en este reto que nos propusimos y por soportarme. Gracias por todo lo que me enseñaste.

A todos mis amigos, por hacer parte de mi vida académica y social. Espero siempre contar con ustedes.

A la microbióloga Sandra Rodríguez, el ingeniero Walner López y al doctor Ángel Polo por sus valiosos aportes a esta investigación. Sin ustedes esto no hubiese sido posible. GRACIAS!

Y a cada una de las personas que hicieron que esto fuera posible, con sus aportes desde su conocimiento los cuales nos fueron de mucha ayuda en momentos críticos de la investigación. GRACIAS!

Luis Luna.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
2. JUSTIFICACIÓN	5
3. OBJETIVOS	7
3.1. OBJETIVO GENERAL	7
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
4. MARCO REFERENCIAL	8
4.1. ANTECEDENTES.....	8
4.2. MARCO TEÓRICO	10
4.2.1. Sistemas de tratamientos de agua residual.....	10
4.2.1.1. Tipos de sistemas de tratamiento de aguas residuales	10
4.2.1.2. Parámetros físicos	13
4.2.1.3. Parámetros químicos	13
4.2.1.4. Parámetros biológicos.....	15
4.2.2. Contaminación hídrica en Colombia.....	15
4.2.2.1. Energías renovables	16
4.2.2.2. Tipos de energía renovable.....	17
4.2.3. Celda de combustible microbiana (CCM)	19
4.2.3.1. Parámetros a monitorear en la CCM de la eficiencia energética	20
4.2.3.2. Componentes de la CCM	21
4.3. MARCO CONTEXTUAL	23
4.3.1. Ubicación geográfica de Valledupar-Cesar	23
4.3.2. Población.....	24
4.4. MARCO CONCEPTUAL.....	26
4.5. MARCO LEGAL.....	29
5. METODOLOGÍA	32
5.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	32
5.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN	32
5.3. POBLACIÓN.....	32

5.4. MUESTRA	32
5.5. DESARROLLO METODOLOGICO.....	33
5.5.1. Etapa 1: Establecer los parámetros de diseño y construcción de la CCM.	33
5.5.1.1. Diseño de la celda CCM.....	33
5.5.1.2. Selección de la configuración de la CCM teniendo en cuenta criterios de eficiencia energética	34
5.5.1.3. Selección de materiales constituyentes de la CCM teniendo en cuenta los resultados obtenidos en investigaciones anteriores	35
5.5.1.4. Dimensionamiento de la CCM.....	36
5.5.1.5. Construcción de la CCM	36
5.5.1.5.1. Construcción de la cámara anódica.....	37
5.5.1.6. Caracterización fisicoquímica de los efluentes de aguas residuales	38
5.5.1.6.1. Toma de muestras de la PTAR Salguero	39
5.5.1.6.2. Caracterización físico-química del agua residual	39
5.5.1.7. Inoculación del ánodo de la CCM	40
5.5.2. Etapa 2: Analizar la influencia de los parámetros los fisicoquímicos pH, temperatura, Turbiedad y demanda química de oxígeno (DQO) sobre el rendimiento electroquímico de la CCM	41
5.5.2.1. Monitoreo de variables fisicoquímicas	41
5.5.2.2. Toma de muestras de la CCM	41
5.5.2.3. Análisis de laboratorio	42
5.5.2.4. Procesamiento de datos.....	42
5.5.2.5. Determinación de rangos óptimos de funcionamiento pH, temperatura y DQO.....	42
5.5.3. Etapa 3: Evaluar la eficiencia del proceso de producción de energía por parte de las bacterias al metabolizar diferentes componentes del agua residual	43
5.5.3.1. Caracterización macroscópica y microscópica de los microorganismos presentes en la CCM	43
5.5.3.1.1. Revisión bibliográfica.....	44
5.5.3.1.2. Identificación de microorganismos electrógenos	44
5.5.3.1.3. Aislamiento de microorganismos electrógenos.....	45

5.5.3.1.5. Caracterización macroscópica y microscópica de las cepas seleccionadas	46
5.5.3.2. Monitoreo de parámetros	46
5.5.3.3. Procesamiento de datos mediante gráficas	47
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS	48
6.1. PARÁMETROS DE CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE LA CCM	48
6.1.1. Análisis Taguchi para determinar la configuración optima de la CCM...	48
6.1.2. Caracterización fisicoquímica del efluente de agua residual	49
6.2. ANALISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS FISICOQUIMICOS SOBRE EL RENDIMIENTO ELECTROQUIMICO	50
6.2.1. Monitoreo de parámetros	50
6.2.2. Procesamiento de datos mediante la matriz de correlación	52
6.2.4. Análisis del comportamiento de las variables fisicoquímicas y electroquímicas	56
6.2.5. Análisis comparativo.....	61
6.2.6. Determinación de rangos óptimos de operación	62
6.3. EVALUACION DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE PRODUCCION DE ENERGIA POR PARTE DE LAS BACTERIAS AL METABOLIZAR LA MATERIA ORGANICA E INORGANICA PRESENTE DEL AGUA RESIDUAL.	63
6.3.1. Caracterización macroscópica y microscópica de los microorganismos presentes en la CCM.....	63
6.3.2 Monitoreo y análisis de parámetros.....	64
CONCLUSIONES	71
RECOMENDACIONES.....	74
BIBLIOGRAFÍA.....	75
ANEXOS.....	83
Anexo A. Datos utilizados para el Análisis Taguchi	83
Anexo B. Datos obtenidos a lo largo de todo el proceso de operación de esta investigación.....	84
Anexo C. Imagen de comparación de las membranas Nafion™	87
Anexo D. Permisos otorgados por la empresa EMDUPAR	88
Anexo E. Registro fotográfico de la investigación.....	92
Anexo F. Planos CCM en el software AUTOCAD.	100

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación de Valledupar en Colombia.	23
Figura 2. Casco Urbano del municipio de Valledupar.	24
Figura 3. Proyección de la población de Valledupar.	25
Figura 4. Efectos principales para la relación S/N. Medias de datos.	48
Figura 5. Comportamiento del pH y el voltaje.	57
Figura 6. Comportamiento del pH y la corriente.	57
Figura 7. Comportamiento de la temperatura y el voltaje.	58
Figura 8. Comportamiento de la temperatura y la corriente.	59
Figura 9. Comportamiento de la turbiedad y el voltaje.	60
Figura 10. Comportamiento de la turbiedad y la corriente	60
Figura 11. Comportamiento del voltaje durante el tiempo de operación.	65
Figura 12. Comportamiento de la densidad de corriente durante el tiempo de operación.	66
Figura 13. Comportamiento de la densidad de potencia durante el tiempo de operación.	67
Figura 14. Eficiencia coulombica durante el tiempo de operación.	68
Figura 15. Comportamiento de la EC y la remocion de DQO durante el tiempo de operación.	69

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipo de arreglos ortogonales.	22
Tabla 2. Tipos de mecanismo de transferencia de electrones.	44
Tabla 3. Características fisicoquímicas del agua residual.	50
Tabla 4. Medición de parámetros fisicoquímicos a lo largo de todo el periodo de operación.	51
Tabla 5. Medición y cálculo de parámetros electroquímicos durante todo el proceso de operación.	51
Tabla 6. Correlación de los parámetros fisicoquímicos y electroquímicos obtenidos durante el tiempo de operación.	53
Tabla 7. Comparación de los resultados obtenidos con CCM.	61
Tabla 8. Rangos óptimos de operación para esta investigación.	62
Tabla 9. Características macroscópicas de la biopelícula formada en el ánodo. ...	63
Tabla 10. Características microscópicas de la biopelícula formada en el ánodo. ..	63
Tabla 11. Variación de la resistencia en el tiempo de operación.	68
Tabla 12. Valores del TRH en función de la EC y la remoción de DQO.	70

LISTA DE ACRÓNIMOS

A: amperaje.

V: voltaje.

CCM: Celda de Combustible Microbiano.

EC: eficiencia coulombica.

DP: densidad de potencia.

DC: densidad de corriente.

PEM: Proton Exchange Membrane.

DQO: Demanda Química de Oxígeno

ARS: Agua Residual Sintética

COV: Compuestos Orgánicos Volátiles

TRH: Tiempo de Retención Hidráulica

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket

NTU: Nephelometric Turbidity Unit

INTRODUCCION

El tratamiento de las aguas residuales, se presenta ante la sociedad colombiana más que como una actividad del pos consumo de agua, como una necesidad latente para garantizar la conservación de sus recursos naturales. En Colombia, solamente el 48,2 % de los municipios del país cuentan con sistemas de tratamiento de aguas residuales, solo 541 municipios de los 1.122 registrados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) cuentan con algún tipo de Planta de tratamiento de aguas residuales (Vanegas Loaiza, 2018).

De igual forma la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales es un aspecto de gran importancia, ya que el tratamiento de aguas residuales es al igual que cualquier otra, una actividad económica que está sujeta a la oferta y a la demanda, y debe responder a estas con la mayor eficacia y eficiencia posible.

Es así que las celdas de combustible microbiano (CCM), una tecnología cuyos principios fueron descubiertos por Potter (1911) quien evidenció y reportó la liberación de electrones en el proceso de descomposición de la materia orgánica, ha cobrado importancia entre la comunidad científica y sociedad en general, puesto que el desarrollo a nivel investigativo y comercial de esta, significaría grandes avances en el campo del tratamiento del agua residual y la simultánea generación de energía eléctrica; contribuyendo directamente al desarrollo sostenible de las ciudades.

En esta investigación el objetivo principal es la producción de energía mediante la biodegradación de materia orgánica presente en agua residual doméstica de la planta de tratamiento de aguas residuales “Salguero” del municipio de Valledupar - Cesar utilizando una CCM como alternativa de tratamiento secundario de aguas

residuales cuyos subproductos son agua residual tratada y energía en forma de corriente eléctrica.

La tecnología de CCM nos permite tratar el agua residual con un 70-80 % de eficiencia en remoción de DQO y simultáneamente la generación de energía eléctrica como subproducto del metabolismo microbiano. En esta investigación se utilizó una CCM tipo PEM de cámara sencilla con cátodo al aire, los electrodos utilizados fueron de grafito granular 400 MESH (ánodo) y lamina de grafito electrolítico (cátodo), el inóculo utilizado fue un cultivo mixto de microorganismos presentes en agua residual. Las variables analizadas para evidenciar la generación de energía y el tratamiento biológico del agua residual fueron: eficiencia coulombica, densidad de potencia y densidad de corriente, DQO, turbiedad, pH y temperatura. Los datos fueron procesados y analizado utilizando el programa SPSS 17.0.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad el desarrollo de las sociedades modernas representa un elevado consumo de bienes y servicios, los cuales son obtenidos en gran parte de la naturaleza, dichos bienes (agua cruda, material vegetal, materiales de construcción, etcétera.) y servicios como lo son el cubrimiento de las necesidades básicas, es decir, acceso al agua potable, servicio de electricidad, gas domiciliario y servicio de alcantarillado representan graves impactos al medio ambiente. Dichos impactos no se deben necesariamente al uso del recurso como fuente de servicios, sino, al uso irresponsable e irracional de los mismos, y esto es una problemática que se traslada a cada una de las ciudades del mundo.

Valledupar es un municipio que cuenta con una población aproximada de 453.215 habitantes en su cabecera municipal y en crecimiento constante debido a los fenómenos demográficos, esto cataloga a Valledupar como municipio de primera categoría (Uhía Ramirez, 2016).

Según la Universidad del Atlántico (2011), la ciudad de Valledupar vertía al río Cesar $1,19 \text{ m}^3/\text{s}$ (37,527 millones $\text{m}^3/\text{año}$) de agua residual al río Cesar, y BIOANTEC (2018) a agosto de 2017 la STAR salguero vertía $0,8189 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua residual al río Cesar, este efluente contiene tanto el agua residual doméstica como el agua residual no doméstica (industrial), teniendo en cuenta que las cargas contaminantes de cada una de estas varían dependiendo de la actividad que la genera.

En cuanto a la energía eléctrica el municipio cuenta con una cobertura del 100%, es decir, todas las viviendas del municipio cuentan con acceso legal al servicio de electricidad, y un consumo promedio anual de 198,276 kW, cabe aclarar que esta energía proviene únicamente de fuentes convencionales, no existe en el municipio

ningún aporte de energía por fuentes no convencionales que proporcionen energía renovable (Alcaldía de Valledupar, 2016).

Una de las principales problemáticas a las que se ve enfrentado el municipio de Valledupar, es la generación de aguas residuales tanto domésticas como industriales. El agua residual, también llamada negra o fecal, es la que usada por el hombre ha quedado contaminada. Lleva en suspensión una combinación de heces fecales y orina, de las aguas procedentes del lavado con detergentes del cuerpo humano, de su vestimenta y de la limpieza, de desperdicios de cocina y domésticos. También recibe ese nombre los residuos generados en la industria. El crecimiento de las ciudades y las fábricas, ha contribuido a la magnitud y complejidad del problema de la contaminación ambiental, generando situaciones de costosa corrección, poniendo en peligro la salud pública, encareciendo el proceso de potabilización y degradando el medio (Pistonesi, Haure, & D'elmar, 2010).

El principal impacto generado por las aguas residuales se ve evidenciado en las fuentes naturales en las cuales se hace su disposición final, en el caso del municipio de Valledupar la disposición final de sus aguas residuales se hace en el río Cesar; modificando significativamente sus condiciones tanto fisicoquímicas como microbiológicas por efecto de sus altas cargas contaminantes, a pesar de que estas son sometidas a un previo tratamiento; Estos sistemas están diseñados para remover principalmente materia orgánica, por lo que otros parámetros son poco removidos generando en sus fuentes receptoras grandes afectaciones.

2. JUSTIFICACIÓN

Debido al uso indiscriminado de combustibles fósiles para producir energía convencional, la cual está yendo en decadencia debido al agotamiento o escasez de los recursos que utilizan y al exceso de agua residuales producidas por la humanidad, nace la necesidad de implementar una estrategia para buscar una solución a estas problemáticas ambientales.

Las celdas de combustible microbiano permiten obtener energía limpia a través de las aguas residuales, las mismas que son producidas desmedidamente por toda la comunidad e industrias. Estas aguas aparte de ser fuente de problemáticas sociales y ambientales, brinda la cantidad suficiente de materia orgánica (combustible) y otros contaminantes requeridos para la producción de energía mediante la descomposición de ésta por parte de microorganismos electrógenos, (Borole, Hamilton, Vishnivetskayaa, Leack, & Andras, 2009) los cuales son capaces de transferir los electrones al ánodo en ausencia de mediadores redox artificiales.

Con las aguas residuales como fuente para producir la energía, se lograría una reducción de la contaminación en las mismas, es decir, en la producción de materia orgánica que afecta de manera nociva a los cuerpos de agua a los que se vierte, afectando de esta manera a toda la población que se ve beneficiada por el mismo.

En el mundo se evidencia un deterioro excesivo de los recursos naturales renovables y no renovables para producir energía, ya sea por la utilización de estos para la producción de energía o por efectos secundarios de estas actividades, la implementación de esta nueva alternativa propone lo que se busca hace tiempo, el desarrollo sustentable, mediante iniciativas en pro de la

renovación tecnológica hacia una tecnología industrial que explote los recursos naturales de forma sustentable (Press, 2014).

Determinar la producción de energía a partir de la biodegradación de materia orgánica presente en aguas residuales mediante la implementación de una CCM lograría un cambio en la sociedad, ya que permitiría transformar la visión que se tiene de la forma en cómo se obtiene la energía a el día de hoy, rompiendo esquemas y alcanzando desarrollo científico y tecnológico.

El mayor beneficio de este sistema, al momento de tratar el agua, es la producción de energía para satisfacer las necesidades de la planta de tratamiento, logrando una reducción y un ahorro en cuanto a los gastos económicos y ambientales. Dentro de los gastos económicos se estaría evitando el uso de energía eléctrica por parte de la empresa prestadora del servicio y en los gastos ambientales, cada empresa o industria debe cumplir con determinados parámetros fisicoquímicos al momento verter sus agua residuales al cuerpo de agua, con la CCM, se alcanza una remoción de algunos de estos parámetros, como la DQO, remoción de materia orgánica alrededor de un 70 a un 95% teniendo en cuenta el diseño y la configuración de la CCM (Alzate-Gaviria et al., 2010).

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la producción de energía a partir de la biodegradación de materia orgánica presente en aguas residuales domésticas mediante la implementación de una celda de combustible microbiana (CCM).

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer los parámetros de diseño y construcción de la celda de combustible microbiana.
- Analizar la influencia de los parámetros físicoquímicos pH, temperatura, Turbiedad y demanda química de oxígeno (DQO) sobre el rendimiento electroquímico de la CCM
- Evaluar la eficiencia del proceso de producción de energía por parte de las bacterias al metabolizar la materia orgánica e inorgánica presente en el agua residual.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. ANTECEDENTES

Alzate-Gaviria, Fuentes, Alvare y P.J. (2008) empleó CCM a escala de laboratorio para la generación de electricidad. La celda consistió de dos cámaras separadas por una membrana de intercambio protónico (PEM). Se utilizaron electrodos de papel carbón y un católito acuoso burbujeado con aire para proveer O_2 disuelto al electrodo. La generación de potencia en la CCM, se debió a la presencia de bacterias como biocatalizadores en la cámara del ánodo. Las bacterias fueron obtenidas de un inóculo mixto anaerobio de tipo entérico, empleando agua residual sintética (ARS) como sustrato. Los resultados nos muestran que cuando la CCM fue inoculada con el cultivo bacteriano de tipo entérico dentro de la fase de latencia de 30h seguidas de un rápido incremento en el voltaje en las siguientes 40h, alcanzando un voltaje de 0,4 V y que, a su vez, este voltaje se vio afectado por la disminución de la materia orgánica presente.

Revelo, Hurtado y Ruiz (2013) indicaron que el mayor de los retos de la CCM es la remoción de materia orgánica y la producción de energía, como lo afirman un grupo de investigadores de la Universidad de Nariño-Colombia, basando su proyecto en la presentación y discusión los aspectos más importantes que inciden en el desempeño de una celda de combustible microbiana, tales como su arquitectura, la función microbiana y el tipo de sustratos. En la última década estos sistemas bioelectroquímicos han atraído el interés de diversos investigadores, no sólo por la tendencia mundial en la producción de energía sostenible, sino también por su operación simultánea para degradar materia orgánica y biorremediación. Estas aplicaciones dependen esencialmente del metabolismo microbiano sobre el cual el conocimiento aún es limitado, requiriéndose una mejor comprensión de la compleja ecología microbiana. En países en desarrollo es importante estudiar otras fuentes de microorganismos y sustratos con variada composición química

que puedan ser potenciales combustibles en celdas de diferente configuración. Investigar más sobre estos aspectos será esencial para optimizar y potenciar estos procesos.

Ibañez y Hernandez (2012) determinaron que las CCM son dispositivos que permiten captar la energía eléctrica derivada del proceso de oxidación y reducción que realizan cierto tipo de bacterias sobre la materia orgánica contenida en el agua residual prepararon agua residual sintética, para la puesta en marcha de la CCM. En las primeras fases de la investigación obtuvieron corrientes del orden de microamperios, los prototipos presentaron elevados valores de resistencias internas del orden de 10 k Ω y 51 k Ω , lo cual representó pérdidas de voltaje en la celda, con el prototipo de la fase 3 se redujo la resistencia interna a 900 Ω lo cual re-dujo las pérdidas y aumentó la capacidad de la celda para entregar potencia, con el prototipo de la fase 4 se obtuvieron los mejores resultados eléctricos, la resistencia interna se redujo a 111,76 Ω y la máxima corriente entregada por la celda fue de 1,8 mA, lo cual fue un incremento considerable de acuerdo a los resultados obtenidos en las anteriores fases. La disminución de la resistencia interna fue el resultado de hacer modificaciones en la estructura de la celda como disminuir la distancia entre los electrodos, aumentar el área de la membrana y de los electrodos proporcionalmente.

4.2. MARCO TEÓRICO

4.2.1. Sistemas de tratamientos de agua residual

El primer sistema de tratamiento en la humanidad que se utilizó fue anaerobio: pozo séptico. En 1887 A.N. Talbot de Urbana (Illinois) le colocó baffles a dicho pozo. En 1905 Karl, ingeniero alemán separa las dos fases del proceso: sedimentación y digestión. El gran avance fue el proceso de mineralización de lodos en periodos largos de retención, haciendo más segura e inofensiva la disposición. La primera planta de tratamiento de aguas residuales en Colombia (Vitelma), fue construida en 1.933 en Bogotá (Lizarazo Becerra & Orjuela Gutierrez, 2013).

Es común clasificar a las aguas residuales en dos tipos: industriales y municipales. En muchos casos las aguas residuales industriales requieren tratamiento antes de ser descargadas en el sistema de alcantarillado municipal; como las características de estas aguas residuales cambian de una a otra industria, los procesos de tratamiento son también muy variables. No obstante, muchos de los procesos empleados para tratar aguas residuales municipales se emplean también con las industriales. Existen aguas residuales industriales que tienen características compatibles con las municipales, por lo que se descargan directamente en los sistemas públicos de alcantarillado (Valdez & Vazquez, 2003).

4.2.1.1. Tipos de sistemas de tratamiento de aguas residuales

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales tienen diferentes tipos de clasificación, una de ellos, es por los procesos empleados al momento de tratarlas, como lo son:

- Procesos físicos: Remoción de material en suspensión, rejillas, trituradores, sedimentador primario, espesadores y filtración.

- Procesos químicos: Aplicación de productos químicos para la eliminación o conversión de los contaminantes. Precipitación, adsorción y desinfección.
- Procesos biológicos: Se llevan a cabo gracias a la actividad biológica de los microorganismos. Eliminación de las sustancias orgánicas biodegradables presentes, eliminación del N y P y producción de gases (Lizarazo Becerra & Orjuela Gutierrez, 2013).

A su vez los sistemas de tratamientos de aguas residuales también se clasifican por el grado de tratamiento, tales como:

Tratamientos preliminares, se definen como el proceso de eliminación de los constituyentes de las aguas residuales cuya presencia pueda provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos, operaciones y sistemas auxiliares (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Burton, & Stense, 1996).

- Cribado: Rejas o rejillas de barras metálicas paralelas e igualmente espaciadas. Su función es retener sólidos gruesos que floten o que se encuentren suspendidos en el agua. Pueden ser de limpieza manual (gruesas) o de limpieza mecánica (finas).
- Tamices estáticos: Es un filtro utilizado para la separación sólido-líquida.
- Desarenadores: Estructuras destinadas a remover arenas y otros guijarros presentes en las aguas residuales. Los desarenadores pueden ser rectangulares o circulares; de flujo horizontal o helicoidal; aireados o no; de limpieza manual o mecánica. Tienen como función prevenir la abrasión de equipos mecánicos, evitar la sedimentación de arenas en tuberías, canales y tanques ubicados aguas abajo.

Los tratamientos primarios, son utilizados para la eliminar una fracción de los sólidos en suspensión y de la materia orgánica del agua residual.

- **Sedimentación:** La sedimentación es un proceso físico que aprovecha la diferencia de densidad y peso entre el líquido y las partículas suspendidas. Los sólidos, más pesados que el agua, se precipitan produciéndose su separación del líquido. La sedimentación primaria aplica para partículas floculentas (con o sin coagulación previa). Los sedimentadores pueden ser circulares o rectangulares.
- **Flotación:** Es un proceso utilizado para la separación de partículas sólidas o líquidas en un medio líquido. En el tratamiento de las aguas residuales se utiliza para remover aceites y grasas y también para aglutinar sólidos suspendidos. La separación se consigue por flotación simple o introduciendo burbujas muy finas de aire en la masa líquida para que arrastren las partículas suspendidas hacia la superficie
- **Coagulación:** Es el proceso por el que los componentes de una suspensión o dilución estables son desestabilizados por suspensión de las fuerzas que mantienen su estabilidad, por medio de coagulantes químicos.

Los tratamientos secundarios, se encargan de la remoción de la DBO soluble y de sólidos suspendidos que no son removidos en los procesos anteriores; aproximadamente el 85% de DBO y SS, aunque la remoción de nutrientes, nitrógeno, fosforo, metales pesados y patógenos es baja. Las reacciones que generan estos procesos son generalmente biológicas.

- **Sistema de biomasa en suspensión –Lodos activados-:** En esencia es la agitación y aireación de una mezcla de agua residual y lodos biológicos, a medida que las bacterias reciben el oxígeno, consumen la materia orgánica del agua residual y la transforma en sustancias más simples. Este caldo bacteriano recibe

el nombre de lodo activado. La mezcla de lodos activados y agua residual recibe el nombre de licor mezclado que se lleva a un tanque de sedimentación para su purga.

- Sistema de biomasa adherida: Los microorganismos se encuentran pegados a un medio de soporte que puede ser de plástico, piedra o cualquier otro material inerte. Dependiendo de las condiciones ambientales que rodean el medio de soporte, los sistemas de biomasa adherida pueden ser aerobios o anaerobios.

Los tratamientos terciarios consisten en procesos físicos y químicos especiales con los que se consigue limpiar las aguas de contaminantes concretos: fósforo, nitrógeno, minerales, metales pesados, virus, compuestos orgánicos, etc. Es un tipo de tratamiento más caro que los anteriores y se usa en casos más especiales como por ejemplo para purificar desechos de algunas industrias. Algunas veces el tratamiento terciario se emplea para mejorar los efluentes del tratamiento biológico secundario. Se ha empleado la filtración rápida en arena para poder eliminar mejor los sólidos y nutrientes en suspensión y reducir la demanda bioquímica de oxígeno.

4.2.1.2. Parámetros físicos

Dentro de los parámetros físicos a determinar de las aguas residuales, es necesario tener en cuenta, sólidos, turbidez, temperatura, olor y color estos son los que permiten establecer la calidad del agua y con base en eso, determinar los tipos de tratamiento a construir para lograr obtener un efluente adecuado.

4.2.1.3. Parámetros químicos

En los parámetros químicos se encuentran los orgánicos, inorgánicos y los gases. Dentro de los orgánicos, se encuentra la materia orgánica, sólidos que provienen

de las actividades humanas relacionadas con la síntesis de compuestos orgánico; Los compuestos orgánicos están formados normalmente por combinaciones de Carbono, Hidrógeno y Oxígeno, con la presencia, en determinados casos, de Nitrógeno, Azufre, Fósforo o Hierro; también se encuentran los compuestos orgánicos volátiles (COV), y las grasas.

Compuestos orgánicos volátiles (COV): normalmente se consideran como aquellos que tienen su punto de ebullición por debajo de los 100 °C, y/o una presión de vapor mayor que 1 mm Hg a 25 °C. El cloruro de vinilo, con un punto de ebullición de - 13,9 °C y una presión de vapor de 2,548 mm Hg a 20 °C, es un ejemplo de compuesto orgánico extremadamente volátil.

Dentro de los inorgánicos tenemos, la concentración del ion Hidrogeno, la alcalinidad, la dureza, los cloruros y los metales pesados. Por último, entre los gases, tenemos el sulfuro de hidrogeno, el metano.

Demanda bioquímica de oxígeno, se considera el parámetro de contaminación orgánica más ampliamente empleado, aplicable tanto a aguas residuales como a aguas superficiales, la determinación del mismo está relacionada con la medición del oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica.

Demanda química de oxígeno (DQO), este ensayo se emplea para medir el contenido de materia orgánica tanto de las aguas naturales como de las residuales. En el ensayo, se emplea un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido para la determinación del equivalente de Oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse. El dicromato potásico proporciona excelentes resultados en este sentido. El ensayo debe hacerse a elevadas temperaturas. Para facilitar la oxidación de determinados tipos de compuestos orgánicos es preciso emplear un catalizador (sulfato de plata).

4.2.1.4. Parámetros biológicos

Los parámetros biológicos están basados en los animales, plantas, arqueobacterias y virus que ocasionan contaminación en las aguas.

4.2.2. Contaminación hídrica en Colombia

La contaminación hídrica en Colombia proviene principalmente de las actividades industriales, domésticas y agropecuarias, además del aporte de residuos de las explotaciones mineras y de sitios de disposición final de residuos.

La contaminación de las aguas puede proceder de fuentes naturales o de actividades humanas. En la actualidad la más importante, sin duda, es la provocada por el hombre. El desarrollo y la industrialización implica un mayor uso de agua, una gran generación de residuos de los cuales muchos, tienen como destino final el agua y el aumento en el uso de medios de transporte fluvial y marítimo que, en muchas ocasiones, son causa de contaminación de las aguas.

Los constituyentes encontrados en las aguas residuales pueden ser clasificados como físicos, químicos y biológicos. De los constituyentes del agua residual, los sólidos suspendidos, los compuestos orgánicos biodegradables y los organismos patógenos son de mayor importancia, y por ello la mayoría de instalaciones de manejo de aguas residuales deben ser diseñadas para su remoción (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Burton, & Stense, 1996)

Entre los distintos contaminantes que contiene el agua residual urbana, cabría destacar la materia orgánica, procedente principalmente de las aguas domésticas; estos compuestos son de naturaleza reductora, por lo que consumirán oxígeno, y pueden estar presentes de forma coloidal y disuelta. Además, existe la presencia

de elementos de la naturaleza orgánica, que pueden ser de distinta composición, desde nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, hasta sustancias tóxicas.

La presencia de materia orgánica junto con otros nutrientes puede provocar alteraciones en la microbiota de un sistema, llegando a producir eutrofización del medio, con presencia de sustancias tóxicas que pueden causar daños muy graves, incluso a los seres humanos, si se utiliza esta agua (Osorio, Torres, & Sanches, 2010).

4.2.2.1. Energías renovables

Como alternativa a las energías convencionales, las cuales casi en su totalidad requieren en sus procesos de producción, transformación de materia prima, la cual es obtenida de los recursos naturales lo que genera una evidente afectación a los mismos pues los consumos de energía de la sociedad día tras día aumentan; Además estos procesos de producción de energía generan como subproductos sustancias nocivas para el medio ambiente; Como solución y/o alternativa a las problemáticas generadas por las energías convencionales nacen las energías renovables.

Las energías renovables son aquellas que se aprovecha directamente de recursos considerados inagotables como el Sol, el viento, los cuerpos de agua, la vegetación o el calor del interior de la Tierra (Unidad de Planeación Minero Energética, 2009). En la actualidad, las energías renovables constituyen fuentes de abastecimiento energético autóctonas y respetuosas con el medio ambiente.

Las Energías Renovables No Convencionales (ERNC), corresponden a las fuentes energéticas eólica, solar, geotérmica, la de los océanos y toda aquella fuente renovable que no tiene una aplicación masiva en la actualidad como lo son las grandes centrales hidroeléctricas de embalse, las que se clasifican como

convencionales. Además, existe una amplia gama de procesos de aprovechamiento de la energía de la biomasa que pueden ser catalogados como ERNC. De igual manera, el aprovechamiento de la energía hidráulica en pequeñas escalas se suele clasificar en esta categoría (Tirapegui, 2006).

Las fuentes convencionales de energía son aquellas utilizadas de forma intensiva y ampliamente comercializadas en el país.

Las fuentes no convencionales de energía son aquellas fuentes de energía disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleadas o son utilizadas de manera marginal y no se comercializan ampliamente.

4.2.2.2. Tipos de energía renovable

La energía solar fotovoltaica consiste en la conversión directa de la radiación solar en electricidad mediante sistemas fotovoltaicos. Un sistema fotovoltaico está formado por las células solares (que transforman la luz en electricidad), un acumulador, un regulador de carga (que impide que llegue más energía al acumulador cuando ha alcanzado su máxima carga) y un sistema de adaptación de corriente (que adapta a la demanda las características de la corriente generada) (Tirapegui, 2006).

La energía geotérmica (EG) es un tipo de energía de tipo termal, formada por un permanente flujo de calor desde el núcleo de la tierra, a través del manto y hacia la superficie terrestre, producto de los procesos naturales o artificiales de acumulación y calentamiento del subsuelo (Farrieta, 2013).

La energía eólica es la energía obtenida de los desplazamientos del aire ocasionado por el desigual calentamiento de la superficie terrestre. Es

considerada una forma indirecta de energía solar (Tirapegui, 2006). Entre el 1 y 2% de la energía proveniente del sol se convierte en viento. La energía cinética del viento puede transformarse en energía mecánica, la cual a su vez se transforma en energía eléctrica al acoplar un generador.

La energía solar térmica o fototérmica, es aquella energía que proviene del aprovechamiento directo de la radiación del sol para la obtención y uso del calor mediante colectores térmicos por los que fluye aire, agua u otro fluido (Tirapegui, 2006). Largamente utilizados para calentamiento de agua en residencias, hospitales, hoteles etc.

La energía de biomasa es aquella que procede del aprovechamiento de la materia orgánica e industrial formada en algún proceso biológico o mecánico y que generalmente es obtenida de los residuos de las sustancias que constituyen los seres vivos (plantas, ser humano, animales, entre otros), o sus restos y residuos.

La energía hidráulica se utiliza fundamentalmente para producir electricidad en las denominadas centrales hidroeléctricas. El agua, retenida en un embalse o presa, se deja caer por una tubería, a cuya salida se coloca una turbina, el eje de la cual comienza a girar al caer al agua; este giro pone en marcha el generador eléctrico obteniéndose así la electricidad (Instituto Tecnológico De Canarias, 2008).

La energía oceánica se obtiene a partir de la energía potencial, cinética, térmica o química del agua de mar, que puede ser transformada para suministrar electricidad, energía térmica o agua potable. Es posible utilizar tecnologías muy diversas: muros de contención de la amplitud de la marea, turbinas submarinas para las corrientes de marea y oceánicas, intercambiadores de calor para la conversión de energía térmica oceánica, y una gran diversidad de dispositivos que permiten controlar la energía del oleaje y los gradientes de salinidad. Si se

exceptúan los muros de contención de la marea, las tecnologías oceánicas se encuentran en fase de demostración o de proyecto piloto, y muchas de ellas deben pasar todavía por una fase de I+D. Algunas presentan pautas de producción de energía variables con diferentes grados de predictibilidad (por ejemplo, las que explotan las olas, el desnivel de las mareas o las corrientes), mientras que otras pueden ser utilizadas en régimen prácticamente constante, o incluso controlable (por ejemplo, las basadas en el gradiente térmico o de salinidad del océano) (Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, 2011).

4.2.3. Celda de combustible microbiana (CCM)

Las CCM son dispositivos que utilizan las bacterias como catalizadores para oxidar la materia orgánica e inorgánica y generar corriente. Los electrones producidos por las bacterias de estos sustratos son transferidos al ánodo (terminal negativo) y fluyen al cátodo (terminal positivo) unido por un material conductor que contiene una resistencia, u operado bajo una carga (es decir, produciendo electricidad que funciona un dispositivo).

Presenta dos cámaras separadas, físicamente o mediante una membrana semipermeable: en una de las cámaras se aloja un electrodo (ánodo) sumergido en una solución química (agua residual, lixiviados, etc) y en la otra un segundo electrodo (cátodo) también dentro de la solución química. En el primero se lleva a cabo la oxidación de ciertas fuentes de combustible, y en el segundo se produce la reducción de un aceptor de electrones que se encuentra en la solución. Estos dos electrodos están conectados por un circuito externo por el que viajan los electrones, del ánodo al cátodo.

4.2.3.1. Parámetros a monitorear en la CCM de la eficiencia energética

Densidad de potencia: es la potencia por unidad de área del electrodo anódico (Wang, Chen, & Huang, 2010) o la potencia por unidad de volumen del sustrato (Luo, y otros, 2010). Se determina mediante la ecuación 1:

$$D_p = \frac{V^2}{v * \Omega_{ext}} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde V^2 es el voltaje medido, v es el volumen del ánodo y Ω_{ext} es la resistencia externa utilizada.

Densidad de corriente (DC): es la corriente por unidad de volumen del electrodo anódico. Se determina mediante la ecuación 2:

$$D_c = \frac{I}{v} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde I son los amperios medidos y v es el volumen del ánodo.

Eficiencia coulombica (EC): es importante porque posibilita comparar el desempeño de diferentes CCM y así poder obtener un nivel de eficiencia a su vez nos permite obtener la fracción de energía eléctrica que se puede generar en la CCM a partir del sustrato (Revelo, Hurtado, & Ruiz, 2013). Se determina mediante la ecuación 3:

$$EC = \frac{\int_0^t I dt * M}{b * F * S * V} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde $\int_0^t I dt$ es la integral del área bajo de la corriente en el tiempo, M es el peso molecular del sustrato empleado, b es el número de moles de electrones producidos por mol de sustrato, F es la constante de Faraday, S es la diferencia de concentración del sustrato y V es el volumen del líquido a tratar (Alzate-Gaviria, Fuentes, Alvare, & P.J., 2008).

4.2.3.2. Componentes de la CCM

Dentro de los componentes elementales de la CCM, se encuentran el ánodo (cámara anaeróbica), el cátodo (cámara aeróbica), resistencia, cables conductores y la membrana de intercambio protónico.

Ánodo: El material de este componente debe ser conductor, biocompatible y bioquímicamente estable con el sustrato a utilizar, de esto dependerá la eficiencia del mismo y la duración de su vida útil. A su vez, los experimentos realizados con anterioridad, muestran que el carbono, más exactamente el grafito granular es uno de los materiales más versátiles y con mayor eficiencia.

Cátodo: El cátodo también es de vital importancia en la CCM, los materiales usados, son muy parecidos a los del ánodo, la mayor diferencia entre ellos es que en la mayoría de los casos el cátodo necesitará una catálisis para la oxidación del Oxígeno. Éste también afecta al funcionamiento de la CCM y su elección variará en función de su aplicación.

Membrana de intercambio protónico: su principal función es la facilidad para canalizar los protones en una sola dirección desde el ánodo hacia el cátodo, por ende, es necesario alta selectividad de protones, estabilidad y firmeza, para obtener el mejor funcionamiento en una CCM.

Arreglos ortogonales: Un arreglo ortogonal se puede comparar con una replicación factorial fraccionada de manera que conserva el concepto de ortogonalidad y contrastes. Un experimento factorial fraccionado es también un arreglo ortogonal (Rao, Kumar, Prakasham, & Hobbs, The Taguchi methodology as a statistical tool for biotechnological applications: A critical appraisal, 2008). Taguchi desarrolló una serie de arreglos particulares que denominó:

$$= L_a(b)^c$$

Donde:

a = Representa el número de pruebas o condiciones experimentales que se evaluarán, que corresponde con el número de renglones o líneas en el arreglo.

b = Representa los diferentes niveles a los que se tomará cada factor.

c = Es el número de efectos independientes que se pueden analizar, esto es el número de columnas.

Tabla 1. Tipo de arreglos ortogonales.

Arreglo ortogonal	Números de renglones	Máximo de número de factores	Número máximo de columnas a estos niveles			
			2	3	4	5
L4	4	3	3	-	-	-
L8	8	7	7	-	-	-
L9	9	4	-	4	-	-
L12	12	11	11	-	-	-
L16	16	15	15	-	-	-
L'16	16	5	-	7	5	-
L18	18	8	1	-	-	-
L25	25	6	-	13	-	6
L27	27	13	-	-	-	-
L32	32	31	31	-	-	-
L'32	32	10	1	12	9	-
L36	36	23	11	13	-	-
L'36	36	16	3	-	-	-
L50	50	12	1	-	-	11
L54	54	26	1	25	-	-
L64	64	62	63	-	-	-
L'64	64	21	-	-	21	-
L81	81	40	-	40	-	-

Fuente: Rao, Kumar, Prakasham, & Hobbs (2008).

4.3. MARCO CONTEXTUAL

El ítem 4.3 se realizó teniendo en cuenta la información registrada en el Plan de Desarrollo Municipal 2016-2019 del municipio de Valledupar (Alcaldía de Valledupar, 2016).

4.3.1. Ubicación geográfica de Valledupar-Cesar

Valledupar es la capital del Departamento del Cesar, cuenta con 204 barrios, 15 asentamientos, 25 corregimientos y 102 veredas, con una extensión de 4.192 km² (el 18% de la extensión del departamento) de los cuales el 40% corresponden a área de protección forestal según la Ley 2ª de 1959. El perímetro urbano abarca 50,5 km² y está dividido en seis comunas.

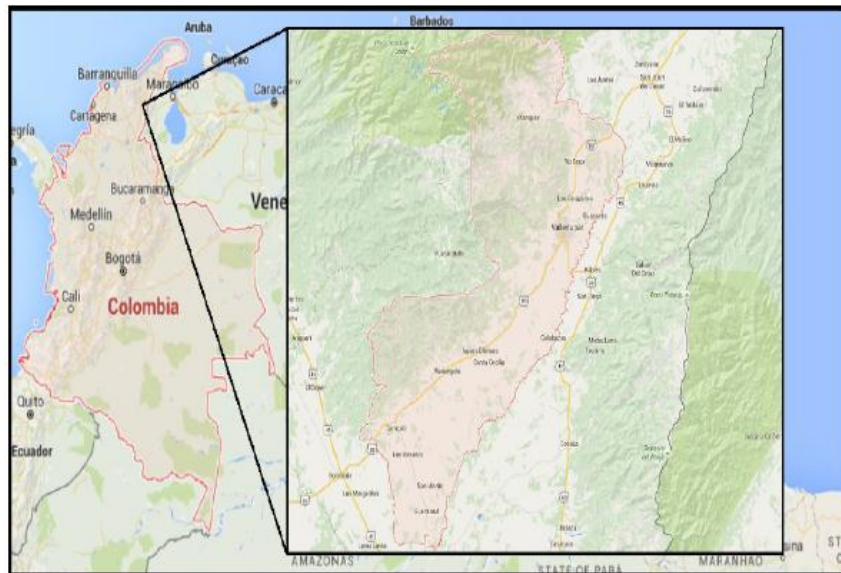


Figura 1. Ubicación de Valledupar en Colombia.

Fuente: Google Maps, 2018



Figura 2. Casco Urbano del municipio de Valledupar.

Fuente: Google Maps, 2018

La ciudad cuenta con acceso vía terrestre hacia Santa Marta y Barranquilla a través de Bosconia, también hacia el centro y sur del departamento por el corredor minero y hacía el norte con los municipios del sur de La Guajira con los que comparten estrechos lazos económicos, étnicos, gastronómicos y culturales. Posee un terminal aéreo el aeropuerto Alfonso López, y un Terminal de Transportes terrestre que presentan alto tráfico durante la celebración del Festival de la Leyenda Vallenata.

4.3.2. Población

Valledupar en 2017 con una población total de 453.215 habitantes, concentrados principalmente en la cabecera municipal (el 40% del departamento). Tan sólo el 15% de la población vive en las zonas rurales. No obstante, esta proporción parece destinada a disminuir con el tiempo. La población crece a una tasa de

2.2% anual, pero se proyecta que este crecimiento tienda a disminuir a 2% al 2020, de acuerdo a los modelos y proyecciones demográficas del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE, 2008).

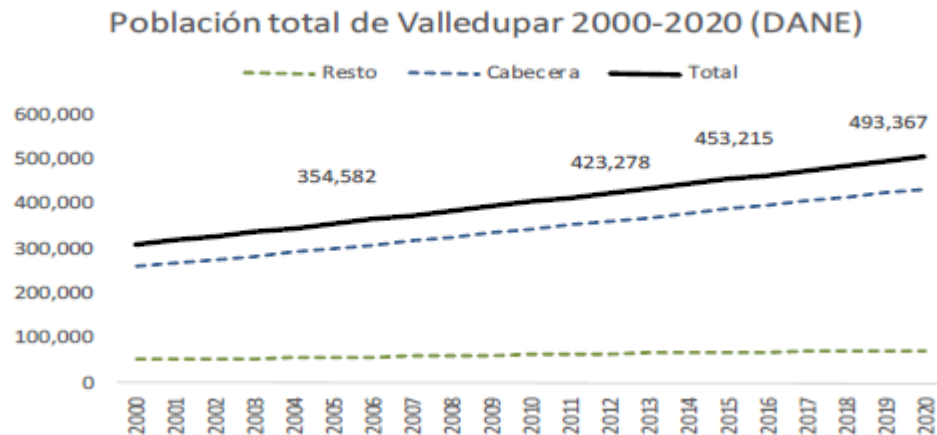


Figura 3. Proyección de la población de Valledupar.

Fuente: DANE, 2008.

4.4. MARCO CONCEPTUAL

Sólidos totales: son los residuos que se obtienen después de someter al agua a un proceso de evaporación a entre 103 y 105 °C.

Sólidos sedimentables: son aquellos que sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica en el transcurso de un periodo de 60 minutos.

Sólidos volátiles: son la fracción orgánica de los sólidos que se volatilizan a temperaturas de 550 - 550 °C.

Turbidez: es la capacidad que tiene la materia finamente dividida o en estado coloidal de dispersar la luz. La turbidez es una característica que se relaciona con el contenido de sólidos finamente divididos que se presentan en el agua. Sus unidades son NTU's (Nephelometric Turbidity Units).

Potencial de Hidrogeno- pH: es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidrógeno $[H]^+$ presentes en determinadas disoluciones.

Densidad: es la masa por unidad de volumen, expresada en kg/m³. A su vez es una característica física importante del agua residual dado que de ella depende la potencial formación de corrientes de densidad en fangos de sedimentación y otras instalaciones de tratamiento.

Dureza: se define como la concentración de todos los cationes metálicos no alcalinos presentes y se expresa en equivalentes de carbonato cálcico y constituye un parámetro muy significativo en la calidad del agua.

Grasas: son compuestos orgánicos constituidos principalmente por ácidos grasos de origen animal y vegetal, así como los hidrocarburos del petróleo.

Alcalinidad: capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar protones.

Cloruros: es uno de los aniones inorgánicos principales en el agua natural y residual. El contenido de cloruros de las aguas naturales es variable y depende principalmente de la naturaleza de los terrenos atravesados.

Materia orgánica: es aquella que tiene origen natural, como frutas, verduras árboles, y todo tipo de plantas y animales, todo lo que se derive de estos pertenece a la materia orgánica, son fácil de desintegrarse y formar parte de la fertilización del suelo.

Color: es la edad del agua residual, que puede ser determinada cualitativamente en función de su color y su olor. El agua residual reciente suele tener un color grisáceo. Sin embargo, al aumentar el tiempo de transporte en las redes de alcantarillado y al desarrollarse condiciones más próximas a las anaerobias, el color del agua residual cambia gradualmente de gris a gris oscuro, para finalmente adquirir color negro.

Biogás: es el producto de la descomposición anaerobia de compuestos orgánicos por la acción de diversas bacterias. Es un gas combustible que se puede generar en condiciones anaeróbicas controladas, mediante la acción de las bacterias metanogénicas que descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno.

Biomasa: es la utilización de la materia orgánica como fuente energética. Por su amplia definición, la biomasa abarca un amplio conjunto de materias orgánicas que se caracteriza por su heterogeneidad, tanto por su origen como por su naturaleza. En el contexto energético, la biomasa puede considerarse como la

materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. También se considera biomasa la materia orgánica de las aguas residuales y los lodos de depuradora, así como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), y otros residuos derivados de las industrias. La valoración de la biomasa puede hacerse a través de cuatro procesos básicos mediante los que puede transformarse en calor y electricidad: combustión, digestión anaerobia, gasificación y pirolisis.

Amperaje: es la fuerza o la potencia en una corriente eléctrica circulando entre dos puntos, estos son el negativo y el positivo a través de un conductor o cable eléctrico; este a su vez se mide mediante la corriente eléctrica producida o también llamado amperio.

Voltaje: es la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos que impulsa a los electrones a lo largo de un conductor en un circuito eléctrico.

Corriente eléctrica: flujo de carga eléctrica que recorre un material conductor durante un periodo

4.5. MARCO LEGAL

Colombia es un país de leyes, que ha participado en diversos tratados internacionales que versan sobre la protección del medio ambiente. Para ratificar su participación en dichos tratados internacionales el gobierno colombiano crea leyes que obliguen el cumplimiento de los compromisos adquiridos.

- **Ley 23 de 1973.** Plantea la necesidad de proteger los recursos naturales renovables, fija límites mínimos de contaminación y establece sanciones por violación de las normas. Se faculta al Presidente de la República para expedir el Código de los Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente.
- **Ley 99 de 1993.** Por el cual se crea el Ministerio de Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental SINA, y se dictan otras disposiciones.
- **Ley 697 de 2001.** Uso Racional de Energía, define como propósito nacional avanzar hacia la utilización de fuentes renovables en pequeña escala y, particularmente, apoya la investigación básica y aplicada para que, con el tiempo, se reduzcan costos y se amplíe la capacidad de energías como la eólica.

Artículo 3°. Uso eficiente de la energía: Es la utilización de la energía, de tal manera que se obtenga la mayor eficiencia energética, bien sea de una forma original de energía y/o durante cualquier actividad de producción, transformación, transporte, distribución y consumo de las diferentes formas de energía, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad, vigente sobre medio ambiente y los recursos naturales renovables.

Desarrollo sostenible: Se entiende por desarrollo sostenible el que conduzca al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de la vida y al bienestar social, sin agotar la base de recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades.

- **Ley 1215 de 2008:** Quienes produzcan energía eléctrica como resultado de un proceso de cogeneración, entendido este como la producción combinada de energía eléctrica y energía térmica que hace parte integrante de su actividad productiva, podrán vender excedentes de electricidad a empresas comercializadoras de energía, esta venta quedará sujeta a la contribución del 20% en los términos establecidos en los numerales 1 y 2 del presente artículo. El cogenerador estará exento del pago del factor pertinente del 20% que trata este artículo sobre su propio consumo de energía proveniente de su proceso de cogeneración.
- **Ley 1715 de 2014.** La finalidad de la presente ley es establecer el marco legal y los instrumentos para la promoción del aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, lo mismo que para el fomento de la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para producción de energía, la eficiencia energética y esta de la demanda, en el marco de la política energética nacional. Igualmente, tiene por objeto establecer líneas de acción para el cumplimiento de compromisos asumidos por Colombia en materia de energías renovables, gestión eficiente de la energía y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, tales como aquellos adquiridos a través de la aprobación del estatuto de la Agenda Internacional de Energías Renovables (Irena) mediante la Ley 1665 del 2013.

- **Decreto 2811 de 1974.** Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

Artículo 69.- Se podrán adquirir bienes de propiedad privada y los patrimoniales de las entidades de derecho público que se requieran para los siguientes fines:

Establecimiento, mejora, rehabilitación y conservación de servicios públicos concernientes al uso de aguas, tales como suministro de estas, alcantarillado y generación de energía eléctrica.

- **Decreto 1623 de 2015.**

Artículo 7. Adiciónese una nueva Subsección 2.3 a la Sección 2 - Capítulo 3 del Título 111-Libro 2 del Decreto Único Reglamentario 1073 201 (...) párrafo 1: Para la determinación de las soluciones aisladas mencionadas en artículo las empresas deberán fuentes no convencionales de energía o licuado de petróleo, según sea económicamente más eficiente.

- **Decreto 2143 de 2015.** Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con la definición de los lineamientos para la aplicación de los incentivos establecidos en el Capítulo 111 de la Ley 1715 de 2014.

- **Resolución 1283 de 2016.** Por el cual se establece el procedimiento y requisitos para la expedición de la certificación de beneficio ambiental por nuevas inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energía renovables- FNCER y gestión eficiente de la energía, para obtener los beneficios tributarios de que tratan los artículos 11, 12, 13, y 14 de la ley 1715 de 2014 y se adoptan otras determinaciones.

5. METODOLOGÍA

5.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación es de tipo exploratoria, debido a que la temática del proyecto ha sido poco abordada en nuestro país y que el desarrollo de la investigación requirió la explicación experimental de cada uno de los factores que influían en el desarrollo del proyecto como lo fueron el tiempo de retención hidráulico (TRH), inoculación de la CCM, sustrato a utilizar, el monitoreo de variables fisicoquímicas del agua y la generación de corriente y voltaje.

5.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

Dado que inmerso en el desarrollo de la investigación se tienen en cuenta muchas variables y que la variación de una o varias de estas, generaría un efecto negativo o positivo para la investigación podemos determinar que el nivel de investigación de este proyecto es de tipo experimental.

5.3. POBLACIÓN

La población en la que se desarrollara el proyecto está conformada por las aguas residuales domésticas de la ciudad de Valledupar.

5.4. MUESTRA

La muestra de agua residual se obtuvo de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Salguero”. Para el desarrollo del proyecto se realizaron dos (2) muestreos en el sistema de tratamiento de aguas residuales “Salguero” ubicada en las afueras de la ciudad de Valledupar, kilómetro 5 vía Valledupar – La Paz, específicamente en una de las cámaras de reparto después de realizado el

tratamiento primario de las aguas residuales. Cada muestra consto de 20 litros, la cual fue almacenada a 4° centígrados para disminuir la actividad bacteriana.

5.5. DESARROLLO METODOLOGICO

5.5.1. Etapa 1: Establecer los parámetros de diseño y construcción de la CCM.

El diseño y conceptualización de la CCM es una etapa de suma importancia para el éxito de la investigación, ya que de este depende la funcionalidad y la eficiencia en la operación de la misma. Para tal fin se utilizó el software Minitab®, con la intención de maximizar la eficiencia del diseño.

5.5.1.1. Diseño de la celda CCM

Se revisó y analizó cuidadosamente la documentación existente referente a las CCM para obtener las bases teórica del diseño y construcción de la misma, empleando un análisis Taguchi mediante el software Minitab® 17, cuyo objetivo principal es la optimización de productos y procesos con el fin de asegurar productos robustos, de alta calidad y bajo costo (Dhavlikar, Kulkarni, & Mariappanc, 2003). A su vez permitió evaluar el efecto de cada componente en sus diferentes niveles. Este procedimiento constó de tres etapas:

- Diseño del sistema
- Diseño de parámetros
- Diseño de tolerancias

Se diseñó un sistema de 3 factores de control con dos niveles cada uno, junto con un arreglo ortogonal L8 permitiendo 8 corridas para las combinaciones

establecidas por el análisis. Los diseños con arreglos ortogonales se concentran principalmente en los efectos principales.

Dentro del diseño de parámetros se especificaron las variables que más influyen en el rendimiento de la CCM y que afectan la característica de calidad en cuanto a magnitud y variabilidad, colocando las opciones más utilizadas por los experimentos realización anteriormente en los niveles. Teniendo en cuenta esto, los factores de control utilizados fueron:

- Diseño de la celda
- Uso de PEM
- Inoculo

Los niveles para cada factor fueron:

- Cámara sencilla y cámara doble
- Sin membrana y Membrana Nafion™ 117
- Agua residual y lodo anaerobio

Se tuvieron en cuenta dos variables de salida para este análisis basándose en el objetivo principal de este trabajo, eficiencia coulombica y densidad de potencia. Las gráficas obtenidas aplicando el análisis Taguchi presentan líneas inclinadas y en algunos casos líneas horizontales que corresponden con las columnas vacías o error aleatorio (Wu & Wu, 1997).

5.5.1.2. Selección de la configuración de la CCM teniendo en cuenta criterios de eficiencia energética

Debido a que existen varias configuraciones posibles para una CCM y estas dependen principalmente de los criterios del diseñador y de los fines con las

cuales se construya; en esta investigación el objetivo es la producción más eficiente de energía y simultaneo tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Valledupar para eso se utilizó el análisis Taguchi.

5.5.1.3. Selección de materiales constituyentes de la CCM teniendo en cuenta los resultados obtenidos en investigaciones anteriores

La selección de los materiales se basó en la eficiencia y la economía de los mismos. Se utilizaron los siguientes materiales:

Estructura de la CCM: teniendo en cuenta las propiedades inertes del acrílico, su transparencia que facilita la observación de los procesos que se llevan a cabo en el interior de la CCM, se seleccionó como material estructural de la CCM la lámina de acrílico de espesor 0,4 cm.

Separador o electrolito: luego de una revisión bibliográfica exhaustiva se identificó que los resultados obtenidos con membranas de intercambio fueron mejores que los obtenidos con soluciones intercambiadoras como puente salino o agar, por ende, se seleccionó membrana de intercambio protónico marca Nafion™117 como separador teniendo en cuentas sus características fisicoquímicas (ver Anexo C).

Ánodo: el ánodo está formado por dos partes, una estructural y otra funcional, la parte estructural es una bolsa de acero inoxidable, la cual se seleccionó teniendo en cuenta las condiciones a las cuales estaría expuesto en la cámara anódica. La parte funcional de grafito granular de 200 MESH, el cual está contenido en la malla de acero inoxidable, se seleccionó el grafito granular debido a su alta conductividad, área de superficie específica lo que favorece la formación de una biopelícula más grande y por ser un material inerte siendo el más apropiado para la investigación. Dentro de la malla de acero inoxidable, el conductor obtuvo una

forma de espiral, con una longitud de 42 cm logrando una mayor área de contacto con los electrones a transferir.

Cátodo: el material utilizado para el cátodo fue una lámina de grafito electrolítico de 8 cm de ancho por 8 cm de alto con un espesor de 1 cm. recubierto en sus bordes por el conductor con una longitud de 32 cm y lograr la conexión con la cámara anódica mediante la PEM.

Conductor: el conductor utilizado fue un cable de cobre con un diámetro de 2 mm, con una longitud de 42 cm en la cámara anódica para lograr una mayor área de contacto debido a que presentan una alta capacidad para conducir electrones y de 32 cm en los bordes del cátodo, evitando el contacto del mismo con la PEM para impedir la incrustación de la misma.

Resistencia: se utilizaron resistencias variables para poder observar el comportamiento energético de la CCM a lo largo del tiempo.

5.5.1.4. Dimensionamiento de la CCM

Con la intención de asegurar un volumen efectivo de 960 ml, teniendo en cuenta el volumen ocupado por el ánodo, las dimensiones de la CCM fueron 12,63 cm de diámetro y 6 cm de alto, en forma tubular para disminuir la aparición de zonas muertas.

5.5.1.5. Construcción de la CCM

Para la construcción de la CCM se utilizaron los materiales antes descritos, el procedimiento realizado fue el siguiente:

5.5.1.5.1. Construcción de la cámara anódica

La cámara anódica se construyó en acrílico de 4 mm de espesor, con la ayuda de una pulidora industrial de 7 pulgadas DEWALT™ referencia DWE4577-B3 para hacer los cortes de forma circular de 7,5 cm de diámetro, que serían las bases de la cámara anódica y una sección rectangular de 6 cm de altura y 47,12 cm de largo; con una pistola de aire caliente 1550 W – 400 °C DEWALT™ D26411, moldeamos la lámina de acrílico hasta obtener la curvatura necesaria para acoplarla a los círculos de 7,5 cm de diámetro. Una vez ensamblada la cámara anódica se hicieron 3 orificios, uno para la instalación del circuito eléctrico externo, el segundo para la entrada del agua residual (afluente) y el tercero para la salida del agua tratada (efluente).

Ánodo: el ánodo está constituido de dos partes, una estructural y otra funcional, la parte estructural consta de una malla de acero inoxidable de 400 MESH con la cual se elaboró una bolsa cubica de 10 cm de altura, 10 cm de ancho y 1 cm de espesor la cual contiene la parte funcional de ánodo, el grafito granular de 200 MESH con un volumen de 106 cm³.

Cátodo: el cátodo se construyó en grafito laminar de 8 cm de cada lado y 1 cm de ancho, a este se ajustó en su contorno, con alambre de cobre de 2 mm de diámetro.

Soporte PEM-cátodo: teniendo en cuenta que la CCM diseñada para esta investigación es de cámara sencilla con cátodo al aire se hizo necesaria la construcción de una estructura que brindara soporte tanto al cátodo como a la PEM y que garantizara que estos estuvieran en contacto para permitir la reacción de reducción de los iones de Hidrogeno que migran a través de la PEM y los electrones que migran por el circuito externo.

Esta estructura se construyó con una lámina de acrílico de 4 mm de espesor. Se cortaron 3 placas de 12x12 cm, en su interior se hizo un recuadro de 8x8 cm, luego en uno de las placas (placa 1), mediante grabado laser, se perforó la forma de la cabeza hexagonal de un tornillo de 5 mm, en las dos placas sobrantes, placa 2 y 3, se taladró con ayuda de un taladro orificios de 5 mm de diámetro por donde pasarían los tornillos. Estas tres placas se fijaron a la cámara anódica con adhesivo sellante (silicona) en el siguiente orden: primero se introducen los tornillos de acero inoxidable en la placa 1, esta se fijó a la cámara anódica con adhesivo sellante (silicona), luego, se ubicó la placa 2 y sobre esta se ubicó la PEM y sobre la PEM la placa 3 de esta forma la PEM quedo prensada entre las placas 2 y 3. El cátodo se ubicó en el recuadro de la placa 3 quedando de esta forma en contacto con la PEM como se muestra en el Anexo F.

Circuito eléctrico externo: el circuito eléctrico externo se utiliza para medir el voltaje y la corriente generados por la CCM. Éste está compuesto por un cable de cobre que conecta al ánodo, que es donde se captan los electrones en la cámara anódica (reacción de oxidación), con el cátodo que libera los electrones para que reaccionen con los iones de Hidrogeno (reacción de reducción) estos dos separados por una resistencia.

5.5.1.6. Caracterización fisicoquímica de los efluentes de aguas residuales

Las características fisicoquímicas del agua residual, antes de entrar y dentro de la CCM, son una variable fundamental para monitorear la eficiencia energética de la misma, teniendo en cuenta que variables como el pH, DQO, temperatura y turbiedad, influyen directamente sobre los microorganismos afectando sus procesos metabólicos, su reproducción y por consiguiente la funcionalidad de la CCM.

5.5.1.6.1. Toma de muestras de la PTAR Salguero

La toma de muestras se llevó a cabo acorde a lo establecido en la Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 5667-2 referente a muestreo y técnicas de muestreo, NTC-ISO 5667-3 referente a las directrices y la guía para la toma de muestras de aguas residuales del IDEAM.

5.5.1.6.2. Caracterización físico-química del agua residual

El objetivo principal de esta investigación es el tratamiento de las aguas residuales y la simultanea generación de energía. Para lograr que estas dos sucedieran de la forma más eficiente. Las variables fisicoquímicas monitoreadas fueron pH, temperatura, turbiedad y DQO usando los materiales y métodos descritos a continuación:

pH: se realizaron mediciones de pH con un lector multiparámetro, pHmetro whaterproof® de precisión 0,01 unidades de pH, dichas mediciones se realizaron a la entrada y la salida del proceso, los datos se almacenaron y procesaron con ayuda de EXCEL®.

Temperatura: se realizaron mediciones de temperatura con un lector multiparámetro, pHmetro whaterproof con precisión de 0,1 °C, estas mediciones se realizaron a la entrada y salida del proceso para evidenciar la variación de la actividad microbiana.

Turbiedad: las mediciones de turbiedad se realizaron utilizando un turbidímetro marca HACH® 2100AN con precisión de 0,001 unidades nefelométrías de turbiedad NTU (Nephelometric Turbidity Unit), estas mediciones se realizaron en la entrada y salida de la CCM.

La determinación de la DQO se realizó mediante el método de reflujo abierto 5220 B, el cual consiste en someter a reflujo una muestra en una solución ácida fuerte, con un exceso conocido de dicromato de potasio $K_2Cr_2O_7$. Después de la digestión $K_2Cr_2O_7$ no reducido que quede, se determina con sulfato de amonio ferroso, para determinar la cantidad consumida y calcular la materia orgánica oxidable en términos de equivalente de Oxígeno. Manténganse constante las proporciones de pesos de reactivos, de volúmenes y de concentraciones cuando se utilicen volúmenes de muestras distintos de 50 mL. El tiempo estándar de reflujo de dos horas puede reducirse si se ha demostrado que un periodo más corto, produce los mismos resultados. Los datos obtenidos fueron almacenados y procesados con ayuda del programa EXCEL®.

5.5.1.7. Inoculación del ánodo de la CCM

5.5.1.7.1. Toma de muestra de inóculo

La toma de muestras se llevó a cabo acorde a lo establecido en la NTC-ISO 5667-13 referente a muestreo de lodos de aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas.

5.5.1.7.2. Proceso de inoculación del ánodo de la CCM

Se inoculó la CCM con lodo anaerobio del reactor UASB del Hospital Rosario Pumarejo de López y estiércol obtenidas de la Finca “Villa Rochi” durante un periodo de 1 mes. Una vez inoculada inició el tiempo de operación de la CCM, luego de varias transferencias del sustrato manejado (agua residual de la PTAR del municipio de Valledupar), para lograr una estabilidad en cuanto a las mediciones de voltajes y amperaje. La CCM se colocó en operación monitoreando parámetros tales como voltaje y corriente determinando de esta manera la densidad de potencia, densidad de corriente y la eficiencia coulombica. Se

realizaron varias corridas con diferentes tiempos de retención hidráulica entre 6,5 y 8,5 horas.

5.5.2. Etapa 2: Analizar la influencia de los parámetros los fisicoquímicos pH, temperatura, Turbiedad y demanda química de oxígeno (DQO) sobre el rendimiento electroquímico de la CCM

Como se dijo anteriormente el rendimiento de la CCM está condicionado en gran manera por las condiciones operativas tales como pH, el cual determina el tipo de microorganismos que inocularán el ánodo y serán los responsables de la degradación de la carga contaminante; la temperatura medida en grados centígrados (°C) que influye en gran manera el metabolismo de los microorganismos y consecuentemente la densidad de corriente (González del Campo, 2015). La demanda química de oxígeno DQO es un factor limitante de la generación de corriente y voltaje puesto que la energía electroquímica es generada en función de la materia orgánica o inorgánica consumida por los microorganismos.

5.5.2.1. Monitoreo de variables fisicoquímicas

Para evaluar la influencia de dichos parámetros fisicoquímicos sobre el rendimiento electroquímico de la CCM se realizaron mediciones constantes durante el tiempo de operación tanto en la entrada como en la salida del sistema teniendo en cuenta los procedimientos descritos en el numeral 5.5.1.6.2.

5.5.2.2. Toma de muestras de la CCM

La toma de muestra se realizó a la entrada y salida de la CCM, tomando volúmenes de muestra suficientes para realizar la medición de turbiedad,

temperatura, pH y DQO. Las muestras fueron procesadas inmediatamente, por ende, no fue necesario su almacenamiento y conservación.

5.5.2.3. Análisis de laboratorio

Los análisis de laboratorio se realizaron en los laboratorios de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad Popular Del Cesar a las muestras de agua previamente tomadas, tales como, medición de pH, temperatura, turbiedad y DQO.

5.5.2.4. Procesamiento de datos

Los datos obtenidos en los análisis de laboratorio fueron analizados y procesados mediante la herramienta EXCEL®, donde se obtuvo el comportamiento de cada uno de los parámetros fisicoquímicos y las variables electroquímicas que interactúan en la CCM. Con el fin de encontrar la dependencia entre las variables analizadas, se realizó una matriz de correlación de Pearson, en la cual se evidenció la influencia de las variables fisicoquímicas en las electroquímicas, mediante el software estadístico IBM® SPSS® statistics versión 24.

5.5.2.5. Determinación de rangos óptimos de funcionamiento pH, temperatura y DQO

Durante la fase operativa se determinaron los rangos óptimos de funcionamiento, esto con base en la máxima densidad de potencia y densidad de corriente teniendo en cuenta que el rendimiento electroquímico de la CCM está altamente influenciado por los parámetros fisicoquímicos. El ajuste de estos parámetros se realizó, en el caso del pH, experimentalmente en el laboratorio, mediante la adición de ácido sulfúrico al 98% de pureza. La determinación de la dosis (Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, Burton, & Stense, 1996) necesaria se realizó basándose en la ecuación 4 de pH:

$$pH = -\log_{10}[H^+] \quad \text{Ec. 4}$$

Los rangos óptimos de los demás parámetros como temperatura y DQO se realizaron teniendo en cuenta los resultados obtenidos en esta investigación y contrastándola con los resultados obtenidos en otras investigaciones en condiciones similares.

5.5.3. Etapa 3: Evaluar la eficiencia del proceso de producción de energía por parte de las bacterias al metabolizar diferentes componentes del agua residual

Para analizar la eficiencia de las bacterias, se calcularon los parámetros de densidad de potencia (DP) y la eficiencia coulombica (EC), ya que son los más significativos al momento de determinar la máxima eficiencia de los microorganismos en la CCM, los cuales tenían como función evaluar el comportamiento electroquímico de esta misma.

A su vez, se realizó una caracterización macroscópica y microscópica de los microorganismos presentes en el ánodo.

5.5.3.1. Caracterización macroscópica y microscópica de los microorganismos presentes en la CCM

Se realizó una revisión de la bibliografía existente que se ha enfocado en la identificación y la clasificación de las especies microbiológicas que metabolizan de manera más eficaz la materia orgánica biodegradable presente en el ARD y con altas producciones de energía (microorganismos electrógenos).

Como se ha mencionado anteriormente en esta investigación, los microorganismos electrógenos se fijan en el ánodo para ceder los electrones generados en su

metabolismo al material conductor del cual está construido este. Por esta razón se hace necesaria la identificación de los microorganismos que conforman la biopelícula formada en el ánodo. Debido a limitantes en cuanto a equipos, se realizó una caracterización macroscópica y microscópica de la biopelícula.

5.5.3.1.1. Revisión bibliográfica

Se revisó cuidadosamente la bibliografía existente referente a las CCM y más exactamente al estudio de los consorcios microbianos utilizados en estas, así como el proceso.

5.5.3.1.2. Identificación de microorganismos electrógenos

A través de la bibliografía citada se evidencian los grandes avances de la microbiología en cuanto a la identificación de microorganismos electrógenos, y su aplicación a las CCM. Se identificaron los microorganismos electrógenos teniendo en cuenta su mecanismo de transferencia de electrones.

Tabla 2. Tipos de mecanismo de transferencia de electrones.

Mecanismo de transferencia de electrones.	Microorganismos electrógenos.
Mediadores externos (diclorofenol, quelatos de hierro y rojo neutro).	<i>Escherichia coli</i> , <i>Bacillus</i> , entre otros.
Mediadores generados por el microorganismo (quinonas, fenazina).	<i>Shewanella</i> , <i>Pseudomonas</i> .
Transferencia directa(citocromos)	<i>Geobacter</i> , <i>Rhodoferrax</i>
Transferencia por medio de	<i>Geobacter</i>

Mecanismo de transferencia de electrones.	Microorganismos electrógenos.
nanocables (pilis).	<i>sulfurreducens</i> , <i>Shewanella</i> <i>oneidensis</i> , <i>Synechocystis</i> , <i>Pelotamuculum</i> <i>Thermopropionicum</i>

Fuente: González del Campo (2015).

5.5.3.1.3. Aislamiento de microorganismos electrógenos

La muestra se tomó directamente del interior del ánodo utilizando una pipeta, se recolectó 1 ml de muestra el cual se vertió en un tubo de ensayo con tapa rosca que contenía 9 ml de agua peptonada al 1 % y posteriormente se incubó a 37 °C durante 24 horas en el interior de una jarra de anaerobiosis, para eliminar los remanentes de Oxígeno se flameó mediante el uso de una vela encendida antes de tapar la jarra para que la combustión consumiera el oxígeno en su interior.

Posterior a la etapa de preenriquecimiento se procedió a realizar diluciones seriadas hasta 10^7 agregando 1 ml de muestra en 9 ml de agua peptonada al 1%. Se realizó una siembra en profundidad por duplicado de las diluciones 10^6 y 10^7 , utilizando agar sangre fundido a una temperatura de 45° C y se incubaron a 37 °C por 24 horas en condiciones anaeróbicas.

5.5.3.1.4. Recuento y purificación de cepas

Para el recuento de las cepas obtenidas se utilizó la fórmula de Izurieta (2009):

$$\text{UFC/ml} = \frac{\text{No. de colonias por placa} \times \text{factor de dilución}}{\text{ml de la muestra sembrada}}$$

De las colonias obtenidas se seleccionaron cinco morfotipos a los cuales se les realizó una tinción de Gram para descartar contaminación, posterior a ello se purificaron las cepas seleccionadas por la técnica de siembra por agotamiento en placas de Agar Sangre y se incubaron a 37°C en condiciones de anaerobiosis.

5.5.3.1.5. Caracterización macroscópica y microscópica de las cepas seleccionadas

Para la caracterización macroscópica se identificaron las características principales de las unidades formadoras de colonia (UFC) como lo son la forma, color, brillo, elevación, textura y bordes.

La caracterización microscópica se realizó mediante la Tinción de Gram atribuida al bacteriólogo Christian Gram, en la que se tocó la colonia con un asa bacteriológica consecutivamente se llevó a una lámina portaobjeto que contenía solución salina, donde se hizo una suspensión bacteriana, mezclando con la misma asa.

Posterior a ello se dejó secar al ambiente y se flameó, luego se procedió a realizar la tinción utilizando en primer lugar el Cristal violeta durante 1min, se lavó para retirar el exceso de colorante y se aplicó Lugol por 1min, se enjuagó y se decoloró con alcohol cetona durante 30 segundos, finalmente se tiñó con Fucsina durante 1 minuto, se lavó y se dejó secar para observar al microscopio óptico a 100x.

5.5.3.2. Monitoreo de parámetros

Para determinar la eficiencia energética se realizó una caracterización electroquímica de la CCM en la cual se monitoreó el comportamiento y la variación de los parámetros.

Las mediciones de voltaje e intensidad de corriente se realizaron utilizando un multímetro digital marca UNI-T UT2002, los cuales iban siendo registrados en

tiempo real. A partir de los mismos se determinó la densidad de potencia, densidad de corriente y eficiencia coulombica, teniendo en cuenta el volumen de la cámara anódica y la remoción de carga orgánica. Las mediciones de voltaje se realizaron a circuito abierto, es decir, no había una carga externa conectada.

5.5.3.3. Procesamiento de datos mediante gráficas

Los datos obtenidos a partir del monitoreo de parámetros fueron analizados y procesados mediante las gráficas realizadas, arrojando los resultados del comportamiento de la CCM a lo largo del tiempo de operación. El análisis se realizó teniendo en cuenta el tiempo de retención hidráulico para cada una de las corridas realizadas.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este apartado se presentan los resultados arrojados mediante la aplicación de la metodología anteriormente descrita, mostrando así la configuración de la CCM seleccionada mediante análisis estadístico, la relación entre parámetros utilizando una matriz de correlación de Pearson y la eficiencia del proceso de producción de energía y remoción de carga contaminante del agua residual.

6.1. PARÁMETROS DE CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE LA CCM

6.1.1. Análisis Taguchi para determinar la configuración óptima de la CCM

Los resultados arrojados del análisis estadístico empleado para seleccionar la mejor configuración de la CCM se analizaron mediante las gráficas obtenidas, ofreciendo los promedios de cada nivel para cada uno de los factores, así como la diferencia entre los promedios de niveles para cada factor.

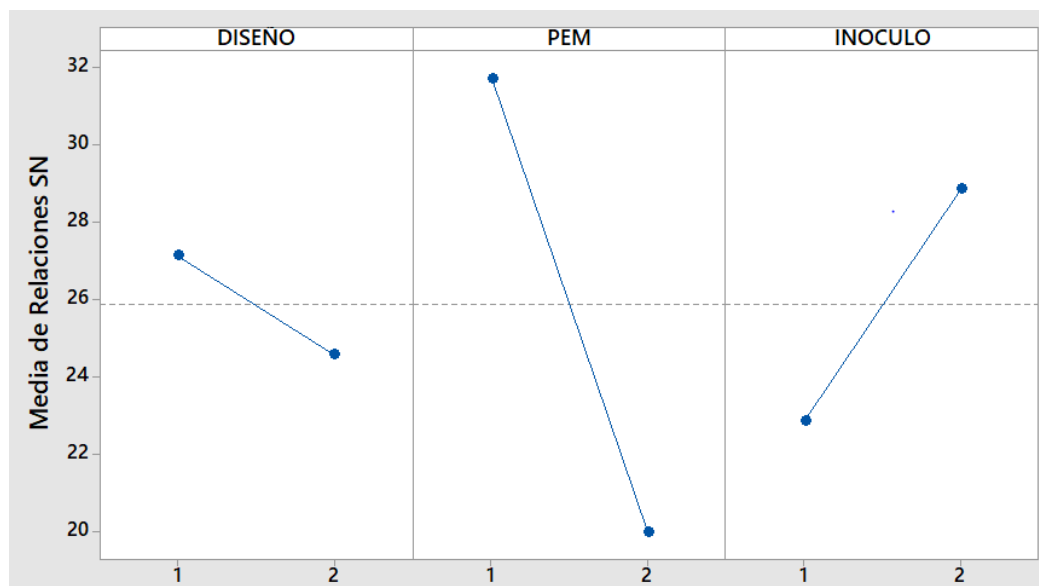


Figura 4. Efectos principales para la relación S/N. Medias de datos.

Fuente: Los Autores, 2018

Debido a la finalidad de esta investigación, obtener la máxima EC y remoción de DQO, se utilizó la gráfica de la relación S/N (más grande es mejor). La figura 5 indica el promedio de cada característica de respuesta para cada nivel de cada factor, siendo que el coeficiente más grande tiene la mayor influencia sobre la característica de respuesta dada, demostrando así, que para el diseño de la CCM el mejor resultado fue cámara sencilla (nivel 1) presentando la media más alta, así mismo para la PEM (membrana Nafion™ 117) y el inoculo, evidenciando que el uso de la misma (nivel 1) y de lodo anaerobio (nivel 2), logran una reducción en la variabilidad de la CCM, es decir, un mayor rendimiento al proceso, siendo de esta manera, la mejor combinación posible teniendo en cuenta los experimentos utilizados para este análisis.

Para la selección de la configuración de la CCM se tuvo en cuenta el análisis anterior, de la misma manera la selección de los materiales constituyentes se realizó basándose en criterios de eficiencia y economía de los mismos. Por ende, se seleccionó la CCM de cámara sencilla con cátodo al aire, la cual consto de 1 cámara anaerobia de forma cilíndrica de 7,5 centímetros de radio interno y altura de 6 centímetros dando como volumen efectivo 960 ml. El ánodo se construyó con una malla 400 MESH de acero inoxidable dispuesta en forma de bolsa cuadrada de dimensiones altura 10 centímetros, ancho 10 centímetros y espesor 1 centímetro que contenía en su interior 120 gramos de grafito electrolítico y 42 centímetros de cable de cobre de diámetro 2 mm como se muestra en el anexo E. El cátodo se construyó con una barra de grafito electrolítico de dimensiones alto 8 centímetros, ancho 8 centímetros y espesor de 1 centímetro. Rodeado por 32 centímetros de cable de cobre de diámetro 2mm (ver anexo F).

6.1.2. Caracterización fisicoquímica del efluente de agua residual

Se realizó la caracterización fisicoquímica en el momento de la toma de muestra, dando como resultados los valores de la Tabla 3.

Tabla 3. Características fisicoquímicas del agua residual.

Parámetro	Unidades	Valor
DQO	mg O ₂ /l	960
pH	-	7,06
Temperatura	°C	24,8
Turbidez	NTU	120
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	284
Conductividad	µS/cm	548
Sales	Psu	0,25

mg O₂/l: miligramo de oxígeno por litro
°C: grados centígrados
NTU: Unidades nefelometrías
mg/L: miligramo por litro
µS/cm: microsiemens por centímetro
psu: unidades plásticas de sal

Fuente: Los Autores, 2018.

Las características fisicoquímicas del agua residual (sustrato), influyen directamente sobre el funcionamiento de la CCM ya que los microorganismos (inoculo) trabajan eficientemente a rangos específicos de pH y temperatura. En cuanto al pH se observa que el agua tiene un pH cercano a neutro (7,06) lo cual favorece el desarrollo de la mayoría de microorganismos anaerobios. Así mismo la temperatura, la DQO, la turbiedad y los SST presentan valores que favorecen la generación de energía.

6.2. ANALISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS FISICOQUIMICOS SOBRE EL RENDIMIENTO ELECTROQUIMICO

6.2.1. Monitoreo de parámetros

En la Tabla 4 se registran los valores medidos de los parámetros más importantes para el óptimo funcionamiento de la CCM a lo largo del periodo de operación, estos valores fueron monitoreados a la entrada y salida del proceso.

Tabla 4. Medición de parámetros fisicoquímicos a lo largo de todo el periodo de operación.

Fecha		Parámetros Fisicoquímicos							
Día	Mes	pH		Temperatura		Turbiedad		DQO	
		E	S	E	S	E	S	E	S
31	Octubre	6,86	7	28,5	29	83,7	23	960	320
2	Noviembre	6,71	7,17	28,2	29,1	51,7	41	960	360
6	Noviembre	6,8	6,89	27,8	29,9	52,2	17,1	960	640
7	Noviembre	7,5	7,34	27,3	28,3	55,6	27,5	960	680
8	Noviembre	6,34	6,76	28,2	29,8	55,2	10,2	960	200
9	Noviembre	7,08	7,53	29,3	25,8	47,2	11,9	960	64
13	Noviembre	7,28	7,75	29,1	26,3	30,4	42,6	960	610

E: valores de entrada

S: valores de salida

Fuente: Los Autores, 2018

Las mediciones del voltaje y corriente realizadas durante el tiempo de operación se presentan en la Tabla 5, así como los cálculos de parámetros electroquímicos, los cuales son necesarios para la determinación de la eficiencia del proceso.

Tabla 5. Medición y cálculo de parámetros electroquímicos durante todo el proceso de operación.

Día	V	A	DP	DC	EC	Ω
31	0,46	2,07	100,08	19528,3	59,36	20
2	0,43	0,002	88,74	21,314	0,09	20
6	0,42	0,25	139,89	2389,49	18,36	12
7	0,40	0,0007	104,75	6,60	0,08	15
8	0,14	0,0003	24,06	2,36	0,01	10
9	0,29	0,0007	16,86	6,44	0,01	51
13	0,52	0,0010	34,09	9,50	0,03	75

Día	V	A	DP	DC	EC	Ω
V: voltaje (voltios) A: corriente (amperios) DP: densidad de potencia (watts/m ³) DC: densidad de corriente (amperio/m ³) EC: eficiencia coulombica (%) Ω: resistencia						

Fuente: Los Autores,2018.

6.2.2. Procesamiento de datos mediante la matriz de correlación

La matriz de correlación de Pearson mide el grado de relación lineal entre cada par de elementos o variables y se utiliza para evaluar la fuerza y dirección de la relación entre dos variables. La tabla 6 muestra los resultados obtenidos para las variables fisicoquímicas y electroquímicas.

Tabla 6. Correlación de los parámetros fisicoquímicos y electroquímicos obtenidos durante el tiempo de operación.

	pHe	Te	TURe	pHs	Ts	TURs	DQOe	DQOs	V	C	EC	DC	DP	Ω
pHe	1													
Te	-0,114	1												
TURe	-0,285	-0,313	1											
pHs	0,781*	0,484	-0,617	1										
Ts	-0,628	-0,612	0,531	-,928**	1									
TURs	0,398	0,259	-0,340	0,522	-0,214	1								
DQOe	. ^b	. ^b	. ^b	. ^b	. ^b	. ^b	. ^b							
DQOs	0,380	-,787*	0,043	-0,142	0,433	0,274	. ^b	1						
V	0,585	0,104	-0,066	0,478	-0,225	,757*	. ^b	0,460	1					
C	-0,111	-0,022	,843*	-0,306	0,245	-0,091	. ^b	-0,042	0,298	1				
EC	-0,140	-0,097	,827*	-0,377	0,324	-0,139	. ^b	0,060	0,320	,982**	1			
DC	-0,111	-0,022	,843*	-0,306	0,245	-0,092	. ^b	-0,042	0,298	1,000**	,982**	1		
DP	0,099	-0,623	0,431	-0,400	0,605	0,140	. ^b	,835*	0,482	0,336	0,451	0,336	1	
Ω	0,485	0,693	-0,644	,883**	-,895**	0,403	. ^b	-0,393	0,379	-0,202	-0,258	-0,202	-0,582	1

pHe: pH entrada; Te: Temperatura entrada; TURe: Turbiedad entrada; pHs: pH salida; Ts: Temperatura salida;
 TURs: Turbiedad salida; DQOe: Demanda química de oxígeno entrada; DQOs: Demanda química de oxígeno salida;
 V: Voltaje; C: Corriente; EC: Eficiencia Coulómbica; DC: Densidad de corriente; DP: Densidad de potencia; Ω : Resistencia.

Fuente: Los Autores, 2018.

Para conocer la relación existente entre las variables fisicoquímicas y las variables electroquímicas de la CCM se realizó una matriz de correlación de Pearson, los dos asteriscos (**) muestran valores con correlaciones altamente significativas con un 99% de significancia y un asterisco (*) muestra correlaciones significativas con un 95% de significancia, los valores se muestran en la tabla 6.

Según los resultados arrojados por el análisis de correlación, las variables turbiedad de salida y voltaje muestran una correlación positiva ($R = 0,757$) con un 95% de significancia, esto se explica por el hecho de que la turbiedad está relacionada con la concentración de microorganismos en la CCM (González del Campo, 2015) y una concentración elevada de microorganismos significa una mayor utilización del sustrato y en consecuencia una mayor generación de electrones.

De igual forma, las variables DQO de salida y temperatura de entrada muestran una correlación negativa ($R = - 0,787$) con un 95% de significancia, lo que se traduce en que, si una de ellas aumenta consecuentemente la otra disminuirá, así pues y como se demostró en esta investigación aumentos en la temperatura significan un aumento en la cinética microbiana y por ende mayor utilización de sustrato (DQO) por parte de los microorganismos permitiendo una disminución de la DQO, teniendo en cuenta no sobrepasar los valores mínimos y máximos de temperatura a los cuales se desarrollan los microorganismos presentes (Sanchez, 2018).

Otras variables que se correlacionan de forma importante son la eficiencia coulombica y la turbiedad de entrada que presentan una correlación positiva ($R = 0,827$) con un 95% de significancia, esto puede asociarse con la concentración de microorganismos electrógenos en la CCM los cuales son los responsables de la degradación de la materia orgánica y la donación de electrones al ánodo.

A pesar de que el análisis de correlación de Pearson demuestra que existe una correlación significativa y altamente significativa para las variables pH entrada – pH salida, Temperatura salida - pH salida, Resistencia - pH salida, Resistencia – Temperatura de salida, densidad de corriente – eficiencia coulombica, densidad de corriente – corriente y eficiencia coulombica – corriente; es imposible para esta investigación demostrar las razones exactas por las cuales se presentan estas, debido a que estas variables no se monitorearon en el tiempo, sin embargo, se pueden explicar someramente algunas de estas basados en los resultados obtenidos y otras investigaciones.

Correlación pH entrada – pH salida: el análisis de correlación de Pearson arrojo una correlación significativa ($R = 0,781$) positiva con un 95% de significancia para las variables pH entrada – pH salida, esto se debe principalmente a que el pH de entrada condiciona las especies microbiológicas que se desarrollaran en la cámara anódica y a su vez estas, a través de sus procesos metabólicos, condicionaron el pH de salida de la CCM.

Correlación Temperatura salida - pH salida: la temperatura es una variable que influye directamente sobre el metabolismo de los microorganismos, así pues, cuando esta se encuentra en los valores óptimos para determinado tipo de microorganismos estos se comportan de manera ideal. Teniendo en cuenta lo anterior y que el análisis de correlación de Pearson arrojo una correlación negativa ($R = -0,928$) altamente significativa con un 99% de significancia lo que nos indica que descensos en la temperatura tendrían como consecuencia aumentos en el pH de salida.

Correlación Resistencia - pH salida: el análisis de correlación de Pearson arrojo una correlación positiva ($R = 0,883$) significativa con un 99% de significancia, esto se puede asociar con el hecho de que la resistencia al flujo de electrones causa modificaciones en el consorcio microbiano (González del Campo, 2015), y por

ende los subproductos del metabolismo microbiano modifican las condiciones de pH de la CCM. De igual forma, la resistencia externa influye en la tasa de consumo de sustrato y en la tasa de producción de protones asociada en el biopelícula del ánodo, por lo que puede afectar el pH en la biopelícula del ánodo (Franks, y otros, 2009) (Torres, Kato Marcus, & Rittmann, 2008).

Correlación Resistencia - temperatura: el análisis de correlación de Pearson demostró una correlación negativa ($R = - 0,895$) con un 99% de significativa, la temperatura es un parámetro fisicoquímico que se puede asociar con la concentración y el metabolismo de los microorganismos en la CCM y la resistencia externa es un factor que condiciona el desarrollo del consorcio microbiano en la CCM, en este sentido, a mayor resistencia externa, el metabolismo de los microorganismos será más lento ocasionando un descenso en la generación de calor por la actividad metabólica y por ende en la temperatura al interior de la CCM.

6.2.4. Análisis del comportamiento de las variables fisicoquímicas y electroquímicas

Los resultados obtenidos del análisis de las figuras 6, 7, 8, 9, 10 y 11, muestran la influencia de los parámetros fisicoquímicos sobre variables electroquímicas de la CCM permiten tomar decisiones importantes encaminadas a mejorar la eficiencia del proceso, en cuanto a generación de energía y tratamiento de aguas residuales.

Se analizaron y procesaron los datos mediante la representación de las gráficas obtenidas, teniendo en cuenta el pH, la temperatura, la turbidez en función del voltaje y de la corriente.

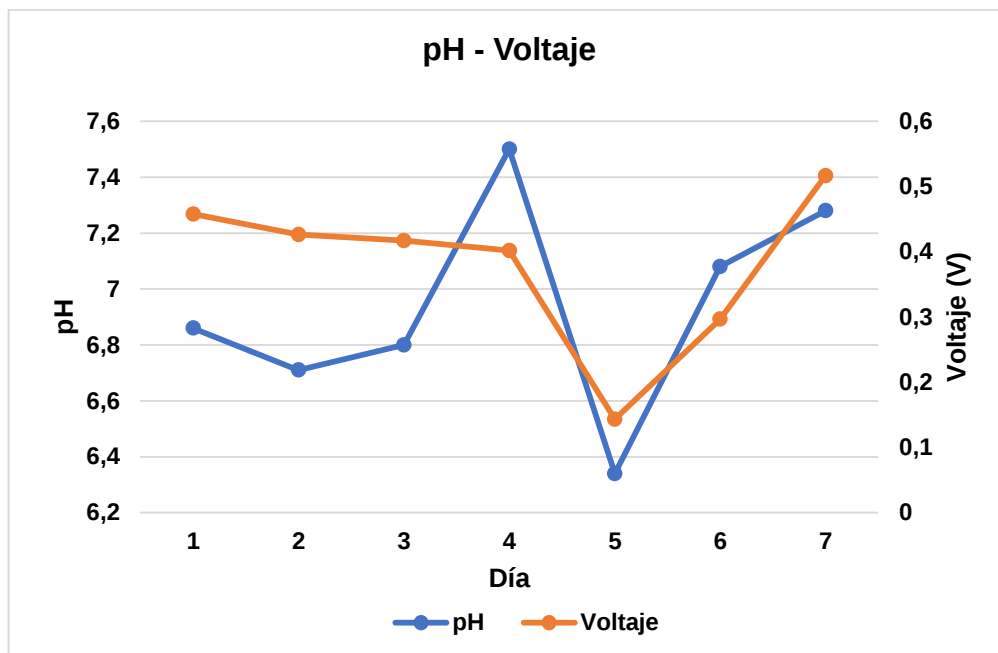


Figura 5. Comportamiento del pH y el voltaje.
Fuente: Los Autores, 2018.

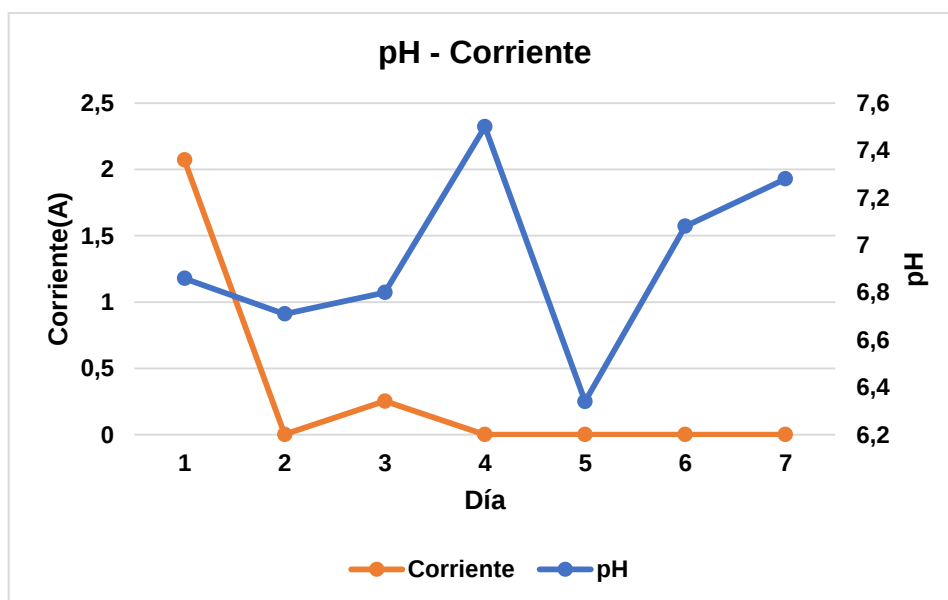


Figura 6. Comportamiento del pH y la corriente.
Fuente: Los Autores, 2018.

La figura 6 y 7 muestra la variación de voltaje y corriente en función del pH a lo largo del tiempo de operación, observando una importante relación entre los

valores de pH y los valores de voltaje, evidenciándose esto el día 5 donde el pH disminuyó drásticamente y en consecuencia la generación de voltaje disminuyó, esto debido a que estas condiciones desfavorecen el desarrollo de microorganismos electrógenos (González del Campo, 2015). Analizando a su vez que los valores máximos de voltaje y corriente se obtuvieron cuando el pH tuvo valores entre 6,7 y 7,3, obteniéndose valores de 0,516 a 0,417 V y 2,04 a 0,25 Amperios. Es necesario aclarar que las bacterias empleadas en este sistema resisten pH ligeramente altos, sin embargo, no toleran pH por debajo de 6,5.

Es importante anotar que luego del periodo de operación (TRH) se observan un aumento en el pH como consecuencia del intercambio de protones de hidrógeno a través de la PEM, disminuyendo la disponibilidad de iones de hidrógeno para la formación de ácidos, mismos responsables de la disminución del pH.

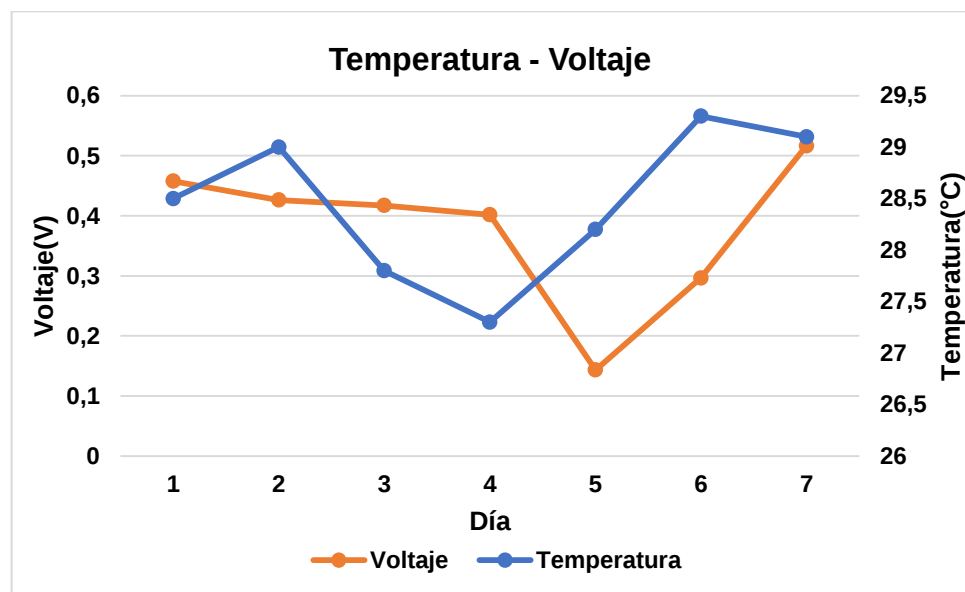


Figura 7. Comportamiento de la temperatura y el voltaje.
Fuente: Los Autores, 2018.

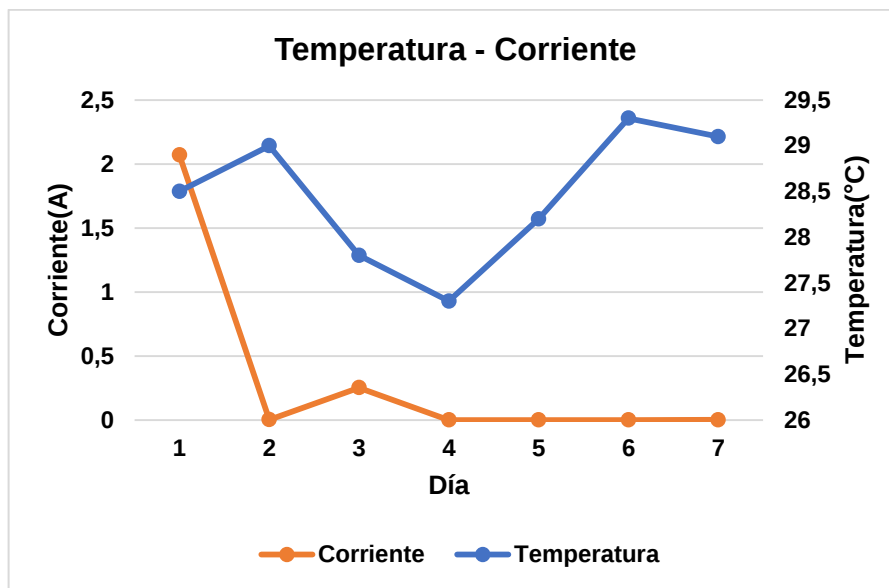


Figura 8. Comportamiento de la temperatura y la corriente.
Fuente: Los Autores, 2018.

La figura 8 y 9 representan la variación del voltaje y la corriente en función de la temperatura, este sistema operó a temperatura mesófila entre 27,3 y 29,3 °C, observando que aumentos en la temperatura provoca aumentos en la generación de voltaje, esto debido a que la influencia de esta sobre las cinéticas microbiana. Sin embargo, el día 5 a pesar de que la temperatura aumentó se observó una disminución en el voltaje, esto debido a la influencia de otros parámetros de mayor incidencia en el proceso.

La temperatura a pesar de ser una variable importante en el proceso de generación de voltaje debido a que influye directamente sobre metabolismo de los microorganismos, según los datos obtenidos el día 5 se puede inferir que la variación en la temperatura tiene menos cambios significativos que la del pH, teniendo en cuenta los cambios en el voltaje y corriente.

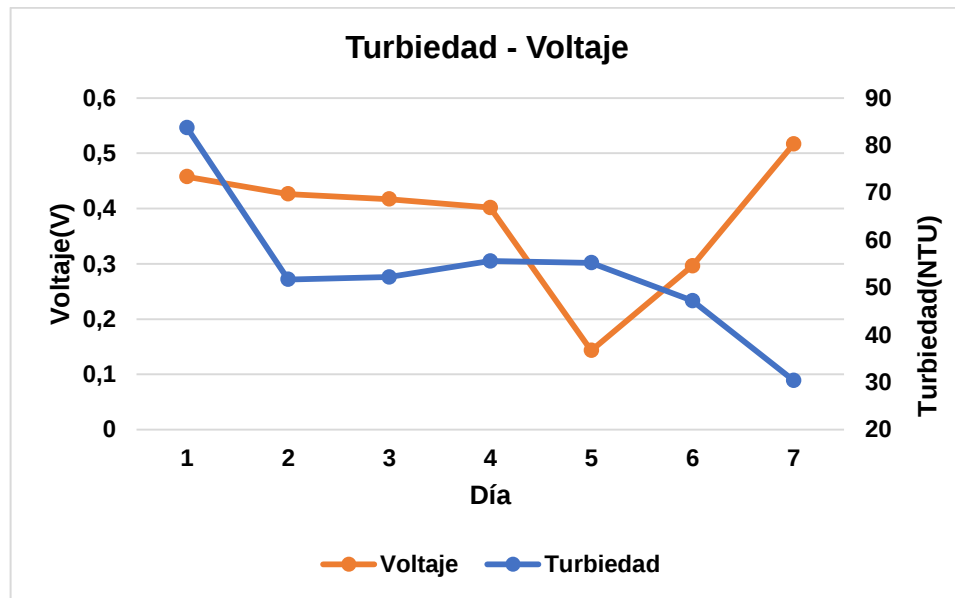


Figura 9. Comportamiento de la turbiedad y el voltaje.
Fuente: Los Autores, 2018.

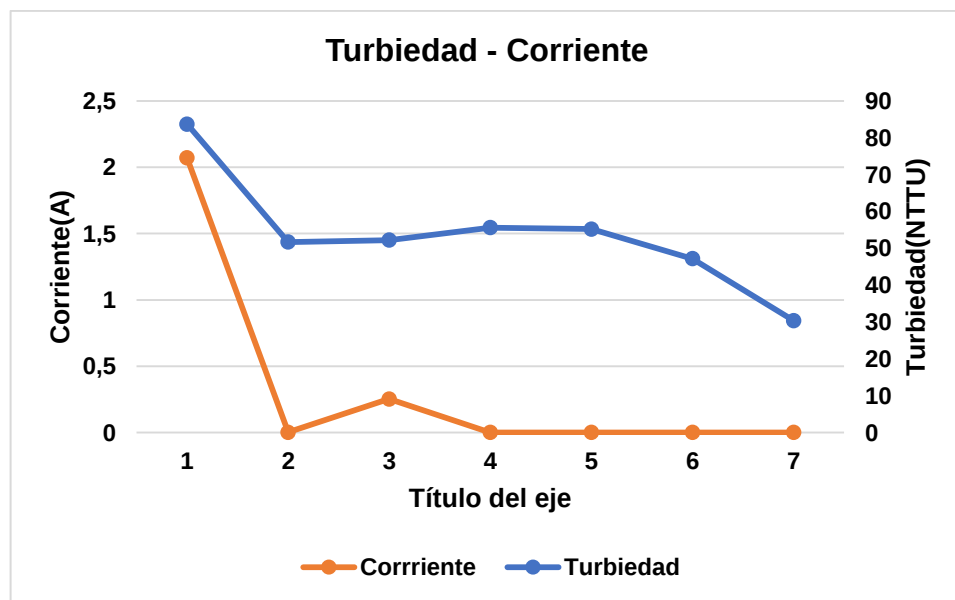


Figura 10. Comportamiento de la turbiedad y la corriente
Fuente: Los Autores, 2018.

En la figura 10 y 11 se observa la relación entre la turbiedad, el voltaje y la corriente. Teniendo en cuenta lo planteado por González del Campo (2015) la turbidez se puede relacionar con la concentración de microorganismos en la CCM, en el día 1 de operación se midió la más alta turbiedad de la investigación y

consecuentemente se observó las más elevadas corrientes de la investigación. Esto se puede asociar con el hecho de que los electrones en la CCM son generados por los microorganismos, y por ende entre mayor sea la concentración de microorganismos en la CCM se espera que la generación de electrones expresada amperes sea mayor, aun cuando no todos los microorganismos presentes en la CCM sean electrógenos.

6.2.5. Análisis comparativo de diferentes investigaciones de CCM

Se realizó un análisis comparativo contrastando los resultados obtenidos en esta investigación (sustrato utilizado, remoción de DQO, inóculo, eficiencia coulombica, densidad de potencia y voltaje) con los alcanzados en otras investigaciones.

Tabla 7. Comparación de los resultados obtenidos con CCM.

Sustrato	Remoción de DQO	Inóculo	EC	DP(mW/m ²)	V	Autor
Glucosa	-	Cultivo mixto	89	3600		(Rabaey, Lissens, Siciliano, & Verstraete, 2003)
Glucosa	-	Bacterias contenidas en el agua residual.	23	1430	320	(Logan, Cheng, Watson, & Stadt, 2007)
Agua residual sintética	65%	Lodo anaerobio	59,8	640	350	(Alzate-Gaviria, Fuentes, Alvare, &

Sustrato	Remoción de DQO	Inóculo	EC	DP(mW/ m2)	V	Autor
Agua residual de procesamiento de alimentos	86%	Lodo anaerobio	21	230	1500	P.J., 2008) (Mansoorian , y otros, 2013)
Agua residual doméstica	93,3	Lodo anaerobio	59,4	139,9(W /m3)	516,5	Esta investigación , 2018

Fuente: Los Autores, 2018

6.2.6. Determinación de rangos óptimos de operación

Según los datos obtenidos en esta investigación y el análisis de los mismos, los rangos óptimos se determinaron, basados en la máxima densidad de potencia y densidad de corrientes obtenidas durante el periodo de operación, los cuales fueron:

Tabla 8. Rangos óptimos de operación para esta investigación.

Parámetro	Valores Óptimos		DP	DC
pH	6,8	7,28		
Temperatura	27,8	29,1	32,78	19528,3
Turbidez	83,7	522		

Fuente: Los Autores, 2018.

6.3. EVALUACION DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE PRODUCCION DE ENERGIA POR PARTE DE LAS BACTERIAS AL METABOLIZAR LA MATERIA ORGANICA E INORGANICA PRESENTE DEL AGUA RESIDUAL.

6.3.1. Caracterización macroscópica y microscópica de los microorganismos presentes en la CCM

De las diluciones sembradas se obtuvo un recuento de 88×10^7 UFC/ml y se seleccionaron cinco morfotipos, los cuales se purificaron en Agar Sangre. Los cinco morfotipos seleccionados presentaron las siguientes características macroscópicas:

Tabla 9. Características macroscópicas de la biopelícula formada en el ánodo.

Morfotipo	Color	Borde	Forma	Brillo	Elevación	Textura
MF1	Gris	Redondo	Redondo	Brillante	Convexa	Mucosa
MF2	Amarilla	Redondo	Redondo	Brillante	Convexa	Seca
MF3	Blanca	Redondo	Redondo	Brillante	Convexa	Mucosa
MF4	Blanca	Redondo	Redondo	Brillante	Plana	Mucosa
MF5	Blanca	Redondo	Redondo	Opaca	Plana	Cremosa

Fuente: Los Autores,2018.

Las características microscópicas presentadas por cada morfotipo se describen en la tabla 10.:

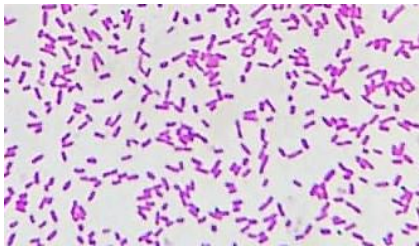
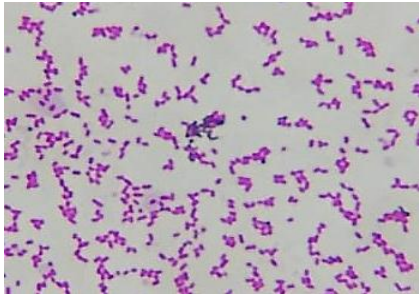
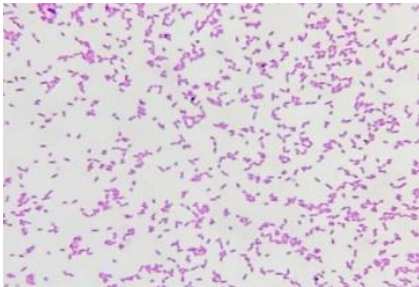
Tabla 10. Características microscópicas de la biopelícula formada en el ánodo.

Morfotipo	Imagen	Característica
-----------	--------	----------------

MF1



Bacilos Gram negativos.

Morfotipo	Imagen	Característica
MF2		Bacilos Gram negativos.
MF3		Bacilos Gram negativos
MF4		Bacilos Gram negativos.
MF5		Bacilos Gram negativos.

Fuente: Los Autores,2018.

6.3.2 Monitoreo y análisis de parámetros electroquímicos en la CCM

La representación de los datos resultantes del monitoreo de los parámetros electroquímicos se muestra en la figura 12.

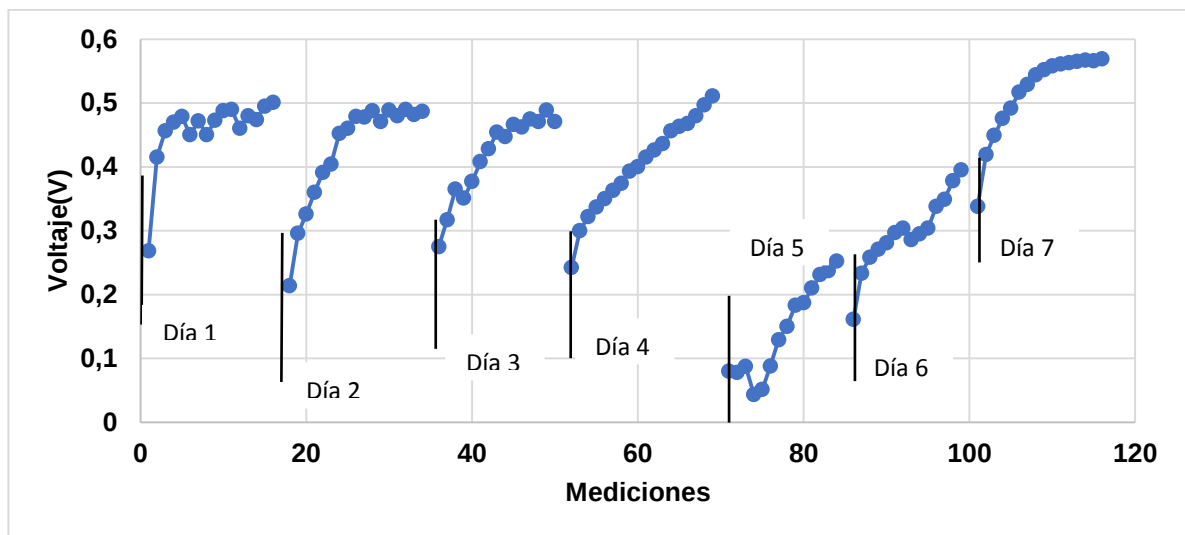


Figura 11. Comportamiento del voltaje durante el tiempo de operación.

Fuente: Los Autores, 2018.

El comportamiento del voltaje a lo largo de todo el tiempo de operación de la CCM, se muestra en la figura 12 teniendo las corridas realizadas bajo diferentes TRH, por ello se evidencian descensos del voltaje, ya que se iniciaba con una nueva alimentación de la CCM, iniciando con unas nuevas mediciones de voltaje. Durante las primeras 4 corridas se observa un voltaje constante y en crecimiento, sin embargo, el día 5 se vio afectado por los cambios inducidos en el pH ocasionando un cambio en el consorcio microbiano afectando directamente a los microorganismos electrógenos (González del Campo, 2015). El día 6 se observó un ascenso de voltaje, debiéndose a un crecimiento nuevamente de los microorganismos electrógenos.

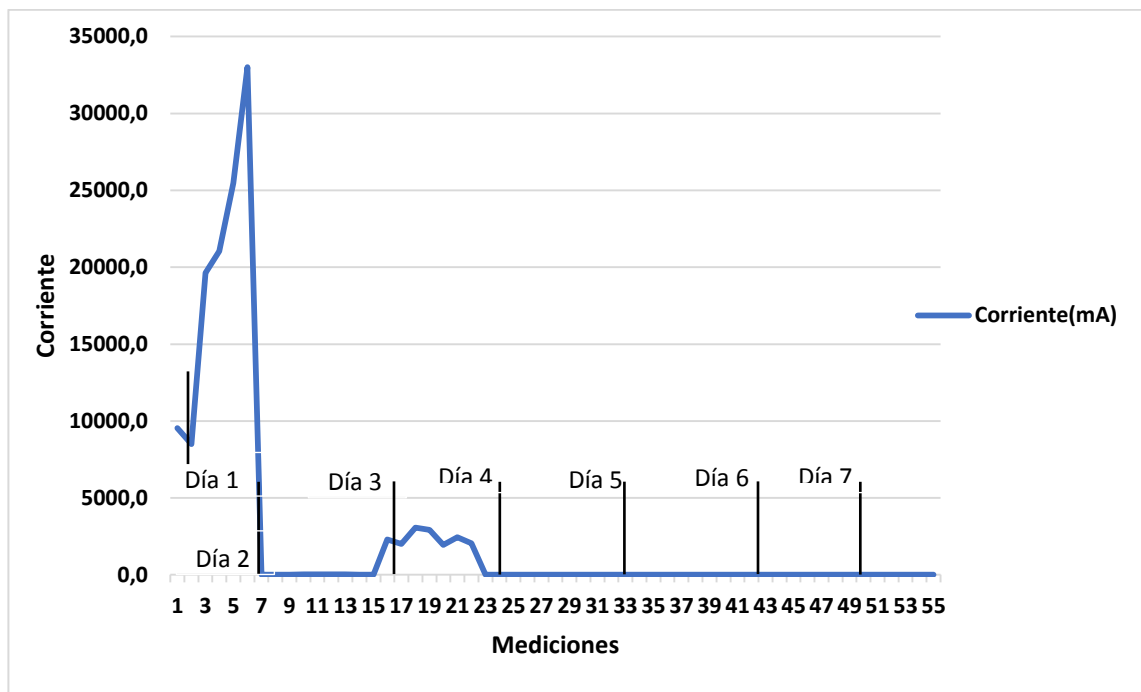


Figura 12. Comportamiento de la densidad de corriente durante el tiempo de operación.

Fuente: Los Autores, 2018.

Los valores de corriente obtenidos en esta investigación se observan en la figura 13, claramente influenciados por los valores de turbiedad inicial del agua residual, y el pH sin negar que las demás variables como temperatura y DQO también tuvieron una posible influencia, a su vez las resistencias externas utilizadas también influyeron, ya que de esta depende la oposición al flujo de electrones.

Como se puede observar las primeras horas de operación (1-13 horas) se obtuvieron los valores máximos de densidad de corriente, utilizándose inicialmente una resistencia baja de 20Ω , teniendo una baja oposición y una mayor densidad de corriente. Este fenómeno se podría asociar a la resistencia interna del sistema, tomando el teorema de Jacobi como referencia, en el que se establece que un sistema tendrá su máxima eficiencia cuando la resistencia interna y la resistencia externa tengan valores iguales o similares, manifestando que el día 1 las

condiciones fueron optimas, presentándose unas resistencia interna y externa con un valor similar, mientras que los demás días las condiciones no favorecieron a que estas se alinearan en sus valores.

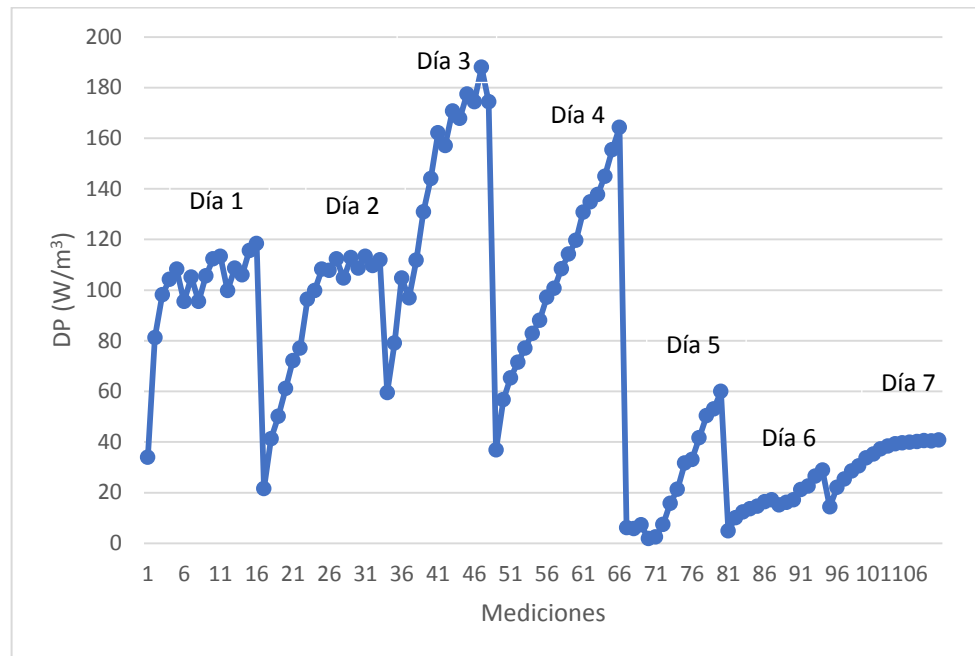


Figura 13. Comportamiento de la densidad de potencia durante el tiempo de operación.

Fuente: Los Autores, 2018.

La densidad de potencia está directamente relacionada con el voltaje, la resistencia externa y el volumen ocupado por el ánodo, los valores descritos en la figura 14 muestran su comportamiento en el tiempo al variar la resistencia, pH y turbiedad. En promedio para cada uno de los 7 días de operación se obtuvieron respectivamente los siguientes valores de DP: 100,08 - 88,73 - 139,89 - 104,75 - 24,06 - 16,86 - 34,08 expresados en W/m^3 , estos cambios tan marcados entre los grupos de días 1-2, 3-4, 5 y 6-7 estuvieron influenciados principalmente por los cambios en la resistencia externa, las cuales se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Variación de la resistencia en el tiempo de operación.

Días	Resistencia
1	20
2	20
3	12
4	15
5	10
6	51
7	75

Fuente: Los Autores,2018.

Las resistencias más altas representaron una mayor oposición al flujo de electrones de la cámara anódica a la cámara catódica.

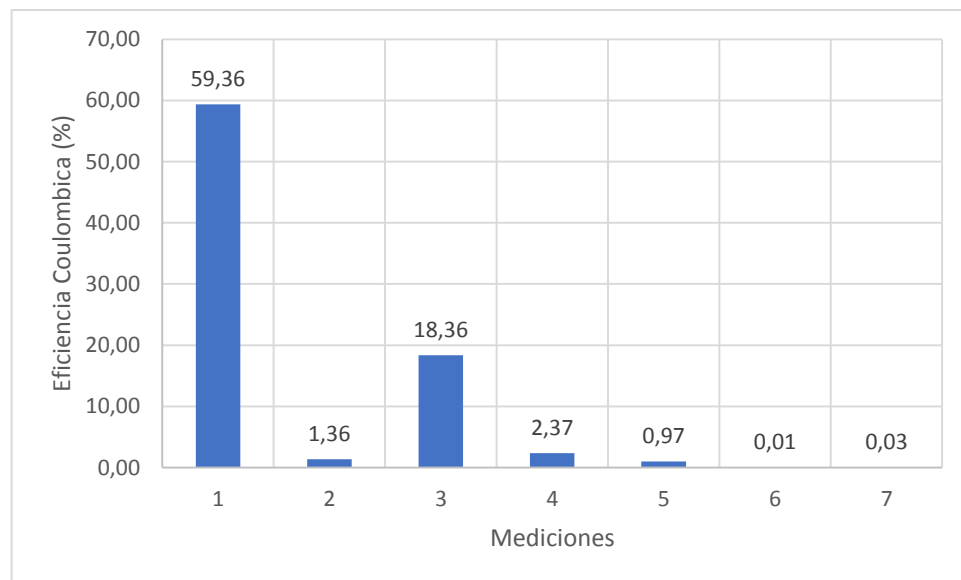


Figura 14. Eficiencia coulombica durante el tiempo de operación.

Fuente: Los Autores,2018.

En la figura 15 se observa el comportamiento de la eficiencia coulombica a lo largo del periodo de operación para cada uno de los TRH, es importante anotar que esta variable nos permite medir de forma directa la conversión de materia orgánica biodegradable en energía eléctrica (electrones). Esta variable, como se observó

en la tabla (análisis estadístico) tiene una correlación positiva significativa para la turbidez. Como se observa el día 1 y día 3 se obtuvieron las máxima eficiencias coulombicas, esto relacionado con valores elevados de turbiedad. Cabe aclarar que a pesar de que en los días 2, 4 también hubo una turbiedad elevada, la eficiencia coulombica se vio afectada debido a la influencia de otros parámetros. El día 5 con fines de observar el comportamiento de la CCM, se modificó el valor de entrada de pH, llevándose hasta 6,3 unidades de pH, el cual tuvo una incidencia negativa sobre el consorcio microbiano y en consecuencia en la corriente producida afectado así la eficiencia coulombica. Los días 6 y 7 el pH se volvió a estabilizar, permitiendo así un equilibrio de la corriente, aunque con un menor.

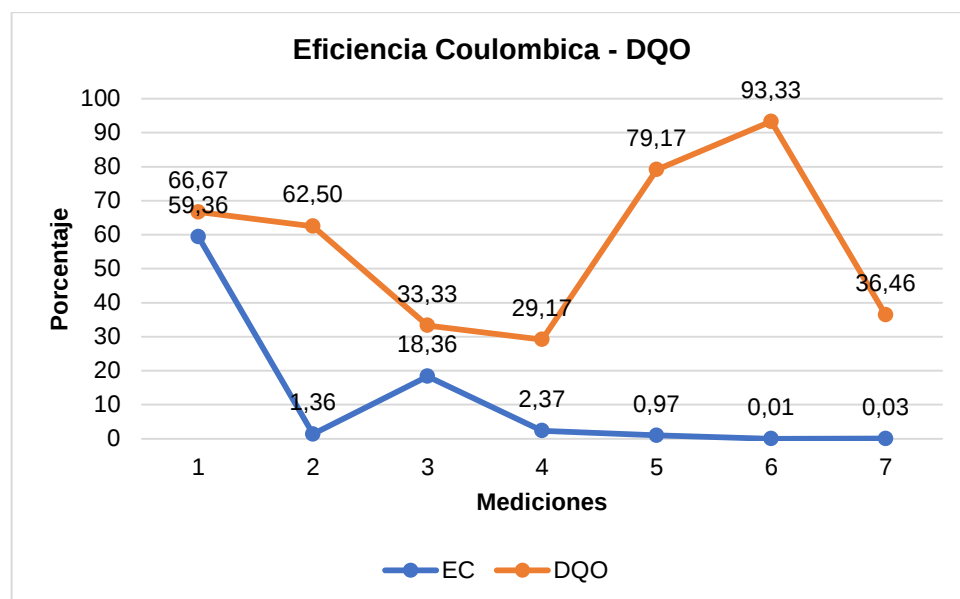


Figura 15. Comportamiento de la EC y la remocion de DQO durante el tiempo de operación.

Fuente: Los Autores,2018.

La figura 16 observa el comportamiento de la EC en función de la remoción de DQO, la DQO y la EC son variables que están estrechamente relacionadas, no obstante, elevados valores de remoción de DQO no siempre se relaciona elevadas

EC, esto debido a que en el consorcio microbiano existen microorganismos electrógenos y no electrógenos los cuales tiene diferentes tiempos de adaptación y reaccionan de forma diferente ante cambios en las variables fisicoquímicas. Esto se evidencia al observar la figura 16 donde a pesar de que el día 6 se obtiene una máxima remoción de DQO se presentó la más baja de las EC, esto influenciado directamente por un cambio drástico en el pH lo que condicionó el tipo de microorganismos que se desarrolló en la CCM (microorganismos no electrógenos).

Tabla 12. Valores del TRH en función de la EC y la remoción de DQO.

DÍA	TRH	EC	DQO
1	8	59,36	66,67
2	8,5	1,36	62,50
3	7,5	18,36	33,33
4	9	2,37	29,17
5	7	0,97	79,17
6	7	0,01	93,33
7	8	0,03	36,46

Fuente: Los Autores, 2018.

El TRH es un parámetro que influye directamente sobre la EC y la remoción de DQO, ya que este representa el tiempo que los microorganismos estarán en contacto con el sustrato. Como se observa en la tabla 12, las variaciones en el TRH son muy pequeñas y por ende su efecto sobre los valores de EC y DQO son poco apreciables ya que otras variables como el pH, la turbiedad y la temperatura influenciaron mayormente los resultados obtenidos en cada una de las corridas.

CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos mediante el análisis Taguchi y los procedimientos realizados en esta investigación, la configuración de cámara sencilla con cátodo al aire y uso de PEM, se establece como productiva y eficiente para las condiciones de operación de la CCM. Sin embargo, en cuanto a la funcionalidad operacional, operando en tipo BACH, no se garantizó que el sustrato estuviese en su totalidad en contacto con el consorcio microbiano fijado en el ánodo.

El uso de la PEM con una amplia área de intercambio protónico facilita la migración de protones de Hidrogeno de la cámara anódica al ambiente y evitó la acumulación de estos y las consecuencias que esto trae para el rendimiento de la CCM.

La generación de corriente se ve afectada positivamente por la elección del material constituyente del ánodo, al estar este construido con grafito granular de tamaño de partícula 400 MESH proporcionaba una mayor superficie de contacto para los microorganismos y por ende mayor área disponible para realizar el intercambio de electrones entre los microorganismos y el ánodo.

El pH demuestra ser uno de los parámetros fisicoquímicos con mayor influencia en el rendimiento electroquímico de la CCM, evidenciándose al bajarlo hasta un valor de 6,34 unidades de pH, ocasionando una alta eficiencia en la remoción de DQO pero una baja generación de voltaje, debido a que las nuevas condiciones del mismo favorecieron el desarrollo de microorganismo no electrógenos los cuales por competencia inhibían el desarrollo de microrganismos electrógenos, por lo cual el proceso de degradación de materia orgánica no tuvo como resultado la generación de voltaje.

La turbiedad es un parámetro que está directamente relacionado con la remoción de la DQO del agua residual, mayor turbiedad se traduce como mayor concentración de microorganismos en la CCM y por ende mayor eliminación de DQO. Por lo contrario, la turbiedad no está necesariamente relacionada con la eficiencia electroquímica de la CCM, ya que esta turbiedad representa tanto microorganismo en suspensión (no electrógenos) y microorganismos electrógenos, compitiendo ambos por el sustrato, con los microorganismos ya establecidos en la biopelícula formada en el ánodo.

La resistencia externa es un parámetro que influye directamente sobre la densidad de corriente, esto debido a que la misma limita el flujo de electrones desde el ánodo hacia el cátodo y por ende disminuye la capacidad del ánodo como aceptor de electrones lo que limita el desarrollo de los microorganismos electrógenos y favorece el desarrollo de microorganismo no electrógenos.

El lodo anaerobio del UASB del Hospital Rosario Pumarejo De López, demuestra ser un inoculo prometedor para ser utilizado en el tratamiento de agua residual doméstica y la simultanea generación de energía mediante la utilización de CCM, ya que los microorganismos presentes en el UASB se encuentran adaptados a las condiciones de operación de la CCM por lo que su tiempo de latencia disminuye y estos se proliferan rápidamente. Igualmente, con los resultados de esta investigación se demostró que entre su microbiota se encuentran microorganismos electrógenos.

La EC y la remoción de DQO arrojan resultados que evidenciaron una alta tasa de conversión del sustrato en energía de hasta el 59% de eficiencia para EC y de un 93% para DQO. Teniendo en cuenta que este proceso se ve directamente influenciado por otros parámetros como el pH que condiciona el tipo de microorganismos que llevan a cabo la degradación del sustrato y la temperatura que influye sobre el metabolismo de los mismos.

En cuanto a la producción de energía (EC) a partir de la degradación de la materia orgánica (DQO) el día 1 de operación se obtuvieron los mejores resultados en cuanto a EC que representa la efectiva utilización del sustrato para la generación de energía obteniendo valores de 59.36 % con una remoción de DQO del 66,66%. Sin embargo, la remoción de DQO más alta se obtuvo el día 6 de operación donde se alcanzó una remoción del 93,33% pero con una EC de 0,01%.

Los resultados del proceso de la degradación de materia orgánica presentes en las aguas residuales del municipio de Valledupar demuestran que es posible la producción de energía mediante la implementación de una CCM, aunque a escala de laboratorio solo se produjo una corriente máxima de 2,07 amperios, lo que indica que esta tecnología a pesar de su muy escasa investigación en Colombia, se ofrece como una atractiva tecnología de producción de energías renovables.

RECOMENDACIONES

Con base en la experiencia adquirida con el desarrollo de esta investigación se postulan las siguientes recomendaciones:

Se recomienda el uso de una tarjeta de adquisición de datos para monitorear los parámetros fisicoquímicos (pH, temperatura, turbiedad y DQO) y electroquímicos (voltaje y corriente) en tiempo real, con el fin de lograr una mayor precisión en sus valores, observar el comportamiento de la CCM a largo del tiempo de operación, determinar la posible influencia entre ellos y el control de los mismos.

Realizar investigaciones con tiempos de retención hidráulicos más largos de los que se manejaron en esta, teniendo en cuenta el efecto que podría ocasionar en la eficiencia coulombica y en la remoción de DQO.

Mejorar el diseño de la CCM, para garantizar que el agua residual obligatoriamente entre en contacto con la biopelícula de microorganismos adherida al ánodo y de esta forma aumentar el rendimiento fisicoquímico y electroquímico de la CCM.

Promover la interdisciplinariedad para el desarrollo de investigaciones enfocadas al estudio de estas tecnologías de producción de energía a partir del tratamiento de las aguas residuales.

BIBLIOGRAFÍA

Alcaldía de Valledupar. (2016). Manual de indicadores de BID y PDM. Cesar, Valledupar. Obtenido de <http://valledupar-cesar.gov.co/apc-aa-files/64343166643864666366396633613364/manual-indicadores-bid-y-pdm-alcaldia-de-valledupar.pdf>

Alcaldía de Valledupar. (2016). Plan de Desarrollo Municipal. Valledupar. Obtenido de <https://www.camacol.co/sites/default/files/VALLEDUPAR-Avanza-VERSION-DEFINITIVA-ACUERDO-001-DE-2016.pdf>

Álzate-Gaviria, L., Fuentes, C., Alvare, A., & P.J., S. (2008). Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiano tipo PEM. *Interciencia*, 33(7), 503-509. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33933706>

Álzate-Gaviria, L., González, K., Peraza, I., García, O., Domínguez, J., Vázquez, J., Canto, B. (2010). Evaluación del desempeño e identificación de exoeletrogenos en dos tipos de celdas de combustible microbiana con diferente configuración en el ánodo. *Interciencia*, 35(1), 19-25. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33913146004>

Borole, A. P., Hamilton, C. Y., Vishnivetskayaa, T., Leack, D., & Andras, C. (2009). Improving power production in acetate-fed microbial fuel cells via enrichment of exoelectrogenic organisms in flow-through systems. *Biochemical Engineering Journal*, 48, 71-80. doi:10.1016/j.bej.2009.08.008

Camposeco-Negrete, C. (2013). Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA. 53, 195-203.

Camposeco-Negrete, C. (2013). Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA. 53, 195-203.

Chen, S., Liu, G., Zhang, R., Qin, B., & Luo, Y. (2012). Development of the microbial electrolysis desalination and chemical-production cell for desalination as well as acid and alkali productions. *Environmental Science and Technology*, 46, 2467-2472.

Congreso de la Republica. (2014). Ley 1715. Bogota.

Dhavlkar, M., Kulkarni, M., & Mariappan, V. (2003). Combined Taguchi and dual response method for optimization of a center less grinding operation. *Journal of Materials Processing Technology*, 132, 90-94.

Farrieta, K. (2013). Políticas públicas en Colombia de generación distribuida en nuevas fuentes energéticas: el caso de la geotermia y las zonas no interconectadas. *Vía Inveniendi et iudicandi*, 8(2), 150-182. doi:10.15332/s1909-0528.2013.0002.07

Franks, A., Nevin, K., Jia, H., Izallalen, M., Woodard, T., & Lovley, D. (2009). Novel strategy for three-dimensional real-time imaging of microbial fuel cell communities: monitoring the inhibitory effects of proton accumulation within the anode biofilm. *Energy Environ*, 2, 113-119.

Ghasemi, M., Daud, W., Ismail, A., Jafari, Y., Ismail, M., Mayahi, A., & Othman, J. (1-6 de 2013). Simultaneous wastewater treatment and electricity generation by

microbial fuel cell: Performance comparison and cost investigation of using Nafion 117 and SPEEK as separators. *Desalination*, 326.

González del Campo, A. (2015). Valoración energética y tratamiento de efluentes residuales mediante celdas de combustibles microbiológicas. Universidad de Castilla-La Mancha, Ciudad Real.

Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. (2011). Fuentes de Energía Renovables y Mitigación del Cambio Climático. IPCC. Obtenido de https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren_report_es.pdf

Hou, B., Sun, J., & Hu, Y. (Febrero de 2012). Performance and microbial diversity of microbial fuel cells coupled with different cathode types during simultaneous azo dye decolorization and electricity generation. *Bioresource Technology*, 111, 105-110. doi:10.1016/j.biortech.2012.02.017

Hoyos, B., Restrepo, A., & Mesa, C. (2010). Ánodos de Pt-Ru y Pt-Ir para celdas de combustible alimentadas con metano y propano directo. *Información Tecnológica*, 18(4). doi:10.4067/S0718-07642007000400007

Ibañez, R., & Hernández, C. (2012). Tratamiento de aguas residuales y generación simultánea de energía eléctrica mediante celdas de combustible microbianas. Bogota.

Instituto Tecnológico De Canarias, S. (2008). Energías renovables y eficiencia energética (1 ed.). Canarias, España: Instituto tecnológico de Canarias.

Izurieta, N. (2009). Tinción y observación de microorganismos. Universidad tecnológica nacional.

Liu, H., & Logan, B. (2004). Electricity Generation Using an Air-Cathode Single Chamber Microbial Fuel Cell in the Presence and Absence of a Proton Exchange Membrane. *Environmental Science and Technology*, 38, 4040-4046.

Lizarazo Becerra, J. M., & Orjuela Gutiérrez, M. I. (2013). *Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia*. Bogota: Universidad Nacional De Colombia. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/11112/1/marthaisabelorjuela2013.pdf>

Logan, B., Cheng, S., Watson, V., & Stadt, G. (2007). Graphite Fiber Brush Anodes for Increased Power Production in Air-Cathode Microbial Fuel Cells. *Environmental Science and Technology*, 41, 3341-3346.

Luo, Y., Zhang, R., Liu, G., Li, J., Li, M., & Zhang, C. (15 de Abril de 2010). Electricity generation from indole and microbial community analysis in the microbial fuel cell. *Journal of Hazardous Materials*, 176, 759-764. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.11.100

Mansoorian, H., Mahvi, A., Jafari, A., Amin, M., Rajabizadeh, A., & Khanjani, N. (2013). Bioelectricity generation using two chamber microbial fuel cell treating wastewater from food. *Enzyme and Microbial Technology*, 52, 352-357.

Metcalf & Eddy, I., Tchobanoglous, G., Burton, F., & Stense, H. D. (1996). *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización* (Tercera ed., Vol. 1). McGraw-Hill Education.

Mohapatra, P., Maity, C., Rao, S., Pati, B., & Mondal, K. (2009). Tannase production by *Bacillus licheniformis* KBR6: Optimization of submerged culture conditions by Taguchi DOE methodology. *Food Research International*, 42, 430-435.

Mohapatra, P., Maity, C., Rao, S., Pati, B., & Mondal, K. (2009). Tannase production by *Bacillus licheniformis* KBR6: Optimization of submerged culture conditions by Taguchi DOE methodology. *Food Research International*, 42, 430-435.

Morris, J., Jin, S., Crimid, B., & Pruden, A. (2009). Microbial fuel cell in enhancing anaerobic biodegradation of diesel. *Chemical Engineering Journal*, 146, 161-167.

Osorio, F., Torres, J. C., & Sanches, M. (2010). Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes: Aplicación de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales. Díaz de Santos.

Pistonesi, C., Haure, J., & D'elmar, R. (2010). Energía a partir de agua residuales. Buenos Aires: Edutecne. Obtenido de http://www.edutecne.utn.edu.ar/energia_aguas_residuales/energia_aguas_residuales.pdf

Potter, M. C. (1911). Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. *The Royal Society*, 84(571), 260-272. Recuperado el 28 de octubre de 2018, de <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/84/571/260>

Press, C. U. (2014). *Climate change 2014 Mitigation of climate change*. Cambridge University Press.

Rabaey, K., Lissens, G., Siciliano, S., & Verstraete, W. (2003). A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency. *Biotechnology Letters*, 25, 1531-1535.

Ramirez, N., Reguerio, A., Arias, O., & Contreras, R. (2009). Espectroscopia de impedancia electroquímica, herramienta eficaz para el diagnóstico rápido

microbiológico. *Biotecnología Aplicada*, 26(1). Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-28522009000100008.

Ramnarayanan, R., Logan, B., & Liu, H. (2004). Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell. *Environmental Science and Technology*, 38, 2281–2285.

Rao, R., Kumar, C., Prakasham, R., & Hobbs, P. (2008). The Taguchi methodology as a statistical tool for biotechnological applications: A critical appraisal. *Biotechnology Journal*, 3, 510-523.

Revelo, D. M., Hurtado, N. H., & Ruiz, J. O. (2013). Celdas de combustible microbianas (ccms): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. *Información tecnológica*, 24(6), 17-28. doi:10.4067/S0718-07642013000600004

Rismani-Yazdy, H., Christy, A., Carver, S., Zhongtang, Y., Dehority, B., & Tuovinen, O. (Enero de 2011). Effect of external resistance on bacterial diversity and metabolism in cellulose-fed microbial fuel cells,. *Bioresource Technology*, 102, 278-283. doi:10.1016/j.biortech.2010.05.012

Sacsaquispe, R., & Ventura, G. (2001). *Manual de procedimientos bacteriológicos en infecciones intrahospitalarias*. Lima: Instituto Nacional de Salud.

Tirapegui, W. (2006). *Introducción a las energías renovables no convencionales* (Primera ed.). Santiago de Chile, Chile: Endesa Chile.

Torres, C., Kato Marcus, A., & Rittmann, B. (2008). Proton transport inside the biofilm limits electrical current generation by anode-respiring bacteria. *Biotechnol. Bioeng*, 100, 872-881.

Uhía Ramirez, A. D. (12 de Abril de 2016). Plan de Desarrollo Municipal. Consejo Municipal, Cesar, Valledupar. Obtenido de <http://concejodevalledupar.gov.co/wp-content/uploads/2016/06/PDM-Valledupar-Avanza-VERSION-DEFINITIVA-ACUERDO-001-DE-2016.pdf>

Unidad de Planeación Minero Energética. (2009). Energía Renovables: Descripción, Tecnologías y Usos Finales. Bogota.

Universidad del Atlántico. (2011). Caracterización e impactos ambientales por vertimientos en tramos de la cuenca media y baja del rio Cesar. Universidad del Atlántico, Atlántico. Valledupar: Universidad del Atlántico. Obtenido de <https://www.corpocesar.gov.co/files/1.informe%20vertimientos.pdf>

Valdez, E. C., & Vázquez, A. B. (2003). Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. Ciudad de México, México: Fundación ICA. Obtenido de <https://civilgeeks.com/2016/08/01/ingenieria-los-sistemas-tratamiento-disposicion-aguas-residuales/>

Vanegas Loaiza, A. (16 de Mayo de 2018). Obtenido de La Republica: <https://www.larepublica.co/infraestructura/solamente-482-de-los-municipios-cuentan-con-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-2611155>

Venkata, S., Srikanth, S., & Sarma, P. (2009). Non-catalyzed microbial fuel cell (MFC) with open air cathode for bioelectricity generation during acidogenic wastewater treatment. *Bioelectrochemistry*, 75, 130-135.

Wang, C., Chen, W., & Huang, R. (13 de Julio de 2010). Influence of growth curve phase on electricity performance of microbial fuel cell by *Escherichia coli*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(13), 7217-7223. doi:10.1016/j.ijhydene.2010.01.038

Wen, Q., Wu, Y., Cao, D., Zhao, L., & Sun, Q. (2009). Electricity generation and modeling of microbial fuel cell from continuous beer brewery wastewater. *Bioresource Technology*, 100, 4171-4175.

Wu, Y., & Wu, A. (1997). *Diseño robusto utilizando los métodos Taguchi*. España: Bravo J. Díaz de Santos.

ANEXOS

Anexo A. Datos utilizados para el Análisis Taguchi

Diseño	Uso PEM	Inoculo	EC	DP	Autor
Sencilla	Nafion™	Agua residual	57.99	155.92	(Venkata, Srikanth, & Sarma, 2009)
Sencilla	Nafion™	Lodo anaerobio	19.75	264	(Wen, Wu, Cao, Zhao, & Sun, 2009)
Sencilla	Sin PEM	Agua Residual	20	146	(Liu & Logan, 2004)
Sencilla	Sin PEM	Lodo anaerobio	12	9	(Ramnarayanan, Logan, & Liu, 2004)
Doble	Nafion™	Agua residual	28	28	(Liu & Logan, 2004)
Doble	Nafion™	Lodo anaerobio	59.8	640	(Alzate-Gaviria, Fuentes, Alvare, & P.J., 2008)
Doble	Sin PEM	Agua residual	-	31	(Morris, Jin, Crimid, & Pruden, 2009)
Doble	Sin PEM	Lodo anaerobio	18	77.3	(Ghasemi, y otros, 2013)

Anexo B. Datos obtenidos a lo largo de todo el proceso de operación de esta investigación

Día	Voltaje	Corriente	DP (W/m3)	DC (A/m3)	Resistencia
31 de octubre	0,268	-	33,8792453	-	20
	0,415		81,2382075		
	0,456	-	98,0830189	-	
	0,47		104,198113		
	0,479	1010	108,226887	9528,3	
	0,45		95,5188679		
	0,472	900	105,086792	8490,6	
	0,45		95,5188679		
	0,473	2080	105,532547	19622,6	
	0,488		112,332075		
	0,49	2230	113,254717	21037,7	
	0,46		99,8113208		
	0,48	2700	108,679245	25471,7	
	0,474		105,979245		
	0,495	3500	115,57783	33018,9	
	0,501		118,396698		
2 de noviembre	0,2136		21,5212075		20
	0,2958	0,715	41,2724717	6,74528302	
	0,326		50,1301887		
	0,36	1,78	61,1320755	16,7924528	
	0,391		72,1136792		
	0,404	2,12	76,9886792	20	
	0,452		96,3698113		
	0,46	3,49	99,8113208	32,9245283	
	0,479		108,226887		
	0,478	2,75	107,775472	25,9433962	
	0,488		112,332075		
	0,471	3,16	104,641981	29,8113208	
	0,489		112,792925		
	0,48	1,8	108,679245	16,9811321	
	0,49		113,254717		
	0,482		109,586792		
	0,487		111,87217		
6 de noviembre	0,275		59,4536164		12
	0,317	243	79,0007862	2292,45283	

Día	Voltaje	Corriente	DP (W/m3)	DC (A/m3)	Resistencia
	0,365		104,736635		
	0,351	212	96,8561321	2000	
	0,377		111,736635		
	0,408	326	130,867925	3075,4717	
	0,428		144,012579		
	0,454	309	162,040881	2915,09434	
	0,447		157,082547		
	0,466	205	170,720126	1933,96226	
	0,462		167,801887		
	0,475	260	177,378145	2452,83019	
	0,471		174,403302		
	0,489	218	187,988208	2056,60377	
	0,471		174,403302		
	0,242		36,8327044		
	0,3	-	56,6037736	-	
7 de noviembre	0,322		65,2100629		
	0,337	0,662	71,427044	6,24528302	
	0,35		77,0440252		
	0,363	0,856	82,8735849	8,0754717	
	0,374		87,972327		
	0,393	0,756	97,1377358	7,13207547	
	0,4		100,628931		
	0,415	0,761	108,31761	7,17924528	15
	0,426		114,135849		
	0,436	0,031	119,557233	0,29245283	
	0,456		130,777358		
	0,463	0,964	134,82327	9,09433962	
	0,468		137,750943		
	0,48	0,831	144,90566	7,83962264	
	0,497		155,351572		
	0,511	0,738	164,227044	6,96226415	
8 de noviembre	0,08	0,00992	6,03773585	0,09358491	
	0,078		5,73962264		
	0,0875	0,64	7,22287736	6,03773585	
	0,043		1,74433962		
	0,051	0,001	2,45377358	0,00943396	10
	0,088		7,30566038		
	0,129	0,1	15,6990566	0,94339623	
	0,15		21,2264151		
	0,183	0,11	31,5933962	1,03773585	

Día	Voltaje	Corriente	DP (W/m3)	DC (A/m3)	Resistencia
	0,187	0,33	32,9896226	3,11320755	
	0,21		41,6037736		
	0,231	50,340566			
	0,237	0,56	52,9896226	5,28301887	
	0,252		59,909434		
9 de noviembre	0,161	0,1824	4,79485757	1,72075472	51
	0,2334		10,0768701		
	0,2584		12,351195		
	0,271	0,9	13,5850906	8,49056604	
	0,281		14,6061783		
	0,2967	0,282	16,2839234	2,66037736	
	0,304		17,0950795		
	0,2857	0,194	15,0988698	1,83018868	
	0,295		16,0978542		
	0,304	1,2	17,0950795	11,3207547	
	0,338		21,1328154		
	0,349	1,23	22,5307066	11,6037736	
	0,378		26,4306326		
	0,395	0,79	28,8614502	7,45283019	
	0,338		1,43703145		
13 de noviembre	0,419	0,58	2,20831447	5,47169811	75
	0,449		2,53586164		
	0,476		2,85001258		
	0,492	0,81	3,04483019	7,64150943	
	0,517		3,36212579		
	0,529		3,52001258		
	0,544	0,28	3,72246541	2,64150943	
	0,552		3,83275472		
	0,558	0,78	3,9165283	7,35849057	
	0,561		3,95875472		
	0,563	1,15	3,98703145	10,8490566	
	0,565		4,01540881		
	0,567	1,51	4,04388679	14,245283	
	0,566		4,02963522		
	0,569	1,85	4,07246541	17,4528302	

Anexo C. Imagen de comparación de las membranas Nafion™

Membrane Type		Nafion HP	Nafion 211	Nafion XL	Nafion 212	Nafion 115	Nafion 117	Nafion 1110
Thickness, Micrometer (mil)		22 (0.8)	25.4 (1)	27.5 (1.1)	50.8 (2)	127 (5)	183 (7)	254 (10)
Basis Weight, g/m ²		43.5	50	55	100	250	360	500
Tensile Modulus, MPa (kpsi)**						249 (36)		
Tensile Strength, maximum, MPa (kpsi)**	MD	38 (5.5)	23 (3.3)	45 (6.5)	32 (4.6)	43 (6.2)		
	TD	41 (5.9)	28 (4.1)	40 (5.8)	32 (4.6)	32 (4.6)		
Elongation at Break, %**	MD	182	252	200	343	225		
	TD	89	311	185	352	310		
Tear Resistance - Initial, g/mm**	MD					6000		
	TD					6000		
Tear Resistance - Propagating, g/mm**	MD					>100		
	TD					>150		
Specific Gravity			1.97		1.97	1.98		
Conductivity, mS/cm	In-Plane	72		72				
	Through-Plane	50.5		50.5				
Available Acid Capacity, meq/g			0.92 min		0.92 min	0.90 min		
Total Acid Capacity, meq/g			0.95 to 1.01		0.95 to 1.01	0.95 to 1.01		
Water Content, % Water		5.0 ± 3.0%	5.0 ± 3.0%	5.0 ± 3.0%	5.0 ± 3.0%	5		
Water Uptake, % Water		50.0±5.0%	50.0 ± 5.0%	50.0 ± 5.0%	50.0 ± 5.0%	38		
Thickness % Increase (from 50% RH, 23 °C to water soaked, 23 °C)						10%		
Thickness % Increase (from 50% RH, 23 °C to water soaked, 100 °C)						14%		
Linear Expansion, % Increase (from 50% RH, 23 °C to water soaked, 23 °C)		1% to 5%	10%	1% to 5%	10%	10%		
Linear Expansion, % Increase (from 50% RH, 23 °C to water soaked, 100 °C)		3% to 11%	15%	3% to 11%	15%	15%		

* MD - machine direction, TD - transverse direction

** Specifications performed at 50% RH, 23 °C

Anexo D. Permisos otorgados por la empresa EMDUPAR

 EMDUPAR E.S.P. Empresa de Servicios Públicos de Valledupar	COMUNICACIÓN EXTERNA	FO-GD-15
		Versión : 03-05-09-18
		Página : 1 de 2

Valledupar, 02 de octubre de 2018

DT-DT-1182

Señorita
YOSELIN SARAY PEREZ MEJIA
LUIS MIGUEL LUNA CASTRO
Estudiantes de Ingeniería Ambiental y Sanitaria
Dirección: Manzana N casa 14, Urb. Altagracia
Tel. 3186468527
Valledupar


Rad Saldo No 2018-111-001948-1
Fecha 4/10/2018 10:15:29 a. m.
Destino: GESTION DOCUMENTAL
Remite: CIU YOSELIN SARAYPEREZMEJIA
Fecha actual 4/10/2018 3:14:59 p. m.
Empresa Emdupar

Asunto: permiso toma de muestra Ptar Salguero. Rad Interna No 3751-2

Cordial Saludo

Por medio de la presente le informamos que su petición con respecto al permiso para realizar la toma de muestra de agua residual en la PTAR EL SALGUERO, ha sido aprobada para el proyecto de grado titulado *producción de energía a partir de la biodegradación de materia orgánica presente en aguas residuales mediante la implementación de una celda de combustible microbiana (CCM)*.

La fecha estipulada, ha sido programada entre el 19 de Octubre hasta el 28 de Octubre del 2018, entre las 8 A.M y 5 P.M de Lunes a Viernes. La toma de muestra la realizaran las estudiantes de Ingeniería ambiental y sanitaria: Luis Miguel Luna CC 1062910270 y Yoselin Saray Perez CC 1067817781.

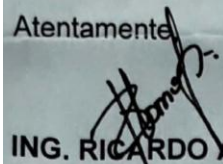
Les informo que es obligatorio, al ingresar a las instalaciones de la PTAR El Salguero utilicen los elementos de protección personal como: botas de caucho, mascarillas, camisa manga larga etc., e incluyendo los elementos de la toma de

Calle 15 No. 15 – 40 – Conmutador: 571-1261 / 58 / 2365 – Valledupar – www.emdupar.gov.co – NIT 892.300.548-8

 EMDUPAR S.A. - E.S.P. Empresa de Servicios Públicos de Valledupar	COMUNICACIÓN EXTERNA	FO-GD-15
		Versión : 03-05-09-18
		Página : 2 de 2

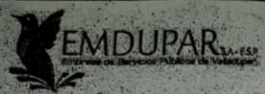
muestras. Además deberán mostrar el presente documento para permitir su entrada a la planta, sin este documento no será posible ingresar.

Atentamente



ING. RICARDO ALFONSO LLANOS BALLESTAS
 Jefe de Gestión Técnica Operativa

	Nombre	Cargo	Firma
Elaborado por:	Leonard Silva Mendoza	Prof. en Gestión técnica	
Proyectado por:	Leonard Silva Mendoza	Prof. en Gestión técnica	
Revisado por:	Ricardo a. Llanos Ballestas	Jefe Gestión técnica	
Los arriba firmantes declaramos que hemos revisado el presente documento y lo encontramos ajustado a las normas y disposiciones legales vigentes y por lo tanto, bajo nuestra responsabilidad, lo presentamos para la firma de Gestión Técnica Operativa.			



COMUNICACIÓN EXTERNA

FO-GD-15

Versión : 03-05-09-18

Página 1 de 2

DT-DT- 1151

Valledupar, 25 de septiembre de 2018

Señor

LUIS MIGUEL LUNA CASTRO

Director Proyecto Investigación.

Programa Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Universidad Popular del Cesar "UPC" Sede Sabanas.

Dirección: Manzana N Casa 14 – Urb. Altagracia

Cel. 3186468527 - 3145824108

Asunto: Solicitud de permiso estudiantes UPC, toma de muestras en la PTAR El Salguero.

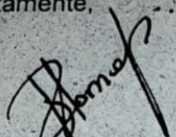
Cordial Saludo,

Por medio de la presente, informamos que su petición con respecto al permiso para la toma de muestras de aguas residuales en la PTAR EL SALGUERO, para llevar a cabo el proyecto de grado titulado: **"PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE LA BIODEGRADACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA PRESENTE EN AGUAS RESIDUALES MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA (CCM)"**, ha sido aprobado. La fecha estipulada para la toma de muestras en la PTAR El Salguero está programada para un lapso aproximado de Una semana, que estarán comprendidos desde el 26 de septiembre al 02 de octubre del 2018. La toma de muestra la realizarán los estudiantes de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la UPC: Luis Miguel Luna Castro con c.c: 1.062.910.270; y Yoselin Saray Perez Mejía con cc: 1.067.722.720.

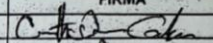
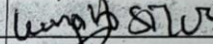
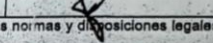
Por otro lado, se le informa que al ingresar a las instalaciones de la PTAR El Salguero usen de manera obligatoria los elementos de protección personal tales como: botas de caucho, mascarar, camisa manga larga etc., e incluyendo los elementos de la toma de muestras. Cabe anotar que las tomas de muestras de aguas residuales serán de lunes a viernes entre las 8 am y 5 pm.

Además deberán mostrar el presente documento para permitir su entrada a la planta; sin este documento no será posible ingresar.

Atentamente,

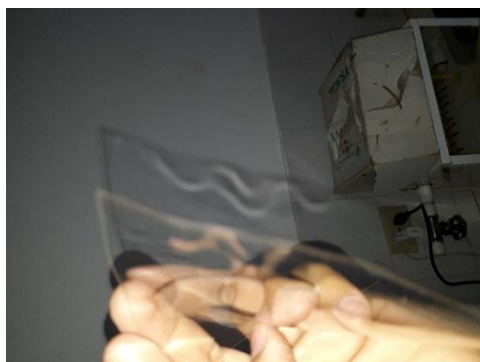


ING. RICARDO LLANOS BALLESTA
 Jefe de Gestión Técnica Operativa

	NOMBRE	CARGO	FIRMA
Elaborado por:	Cenit Dodino Galan	Pasante SENA	
Proyectado por:	Leonard Silva	Prof. Univ. En Gestión técnica Operativa.	
Revisado por:	José Cúvelo Rodríguez	Jefe División Mantenimiento de Redes	
Los arriba firmantes declaramos que hemos revisado el presente documento y lo encontramos ajustado a las normas y disposiciones legales vigentes y por lo tanto, bajo nuestra responsabilidad, lo presentamos para la firma del jefe técnico operativo.			

Anexo E. Registro fotográfico de la investigación

Materiales de la CCM



PEM en contacto con agua destilada



Ánodo ensamblado

Primer ensamblaje de la CCM



Segundo ensamblaje de la CCM



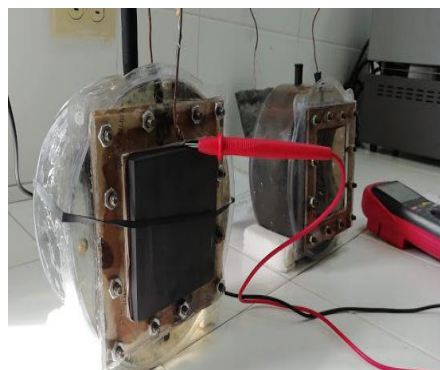
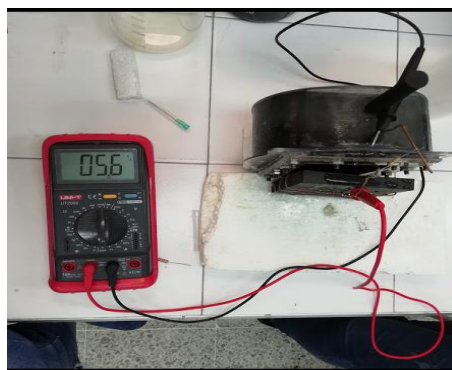
Toma de muestras (Cámara de reparto de la PTAR)



Medición de parámetros fisicoquímicos



Medición de parámetros electroquímicos



Proceso microbiológico

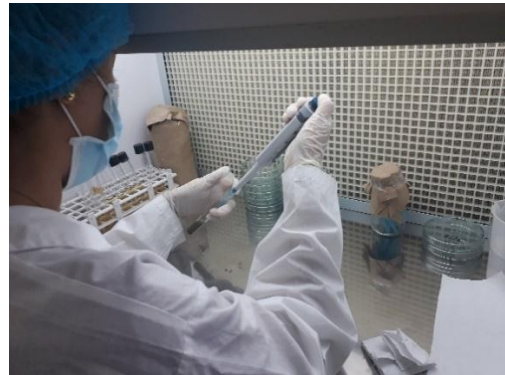
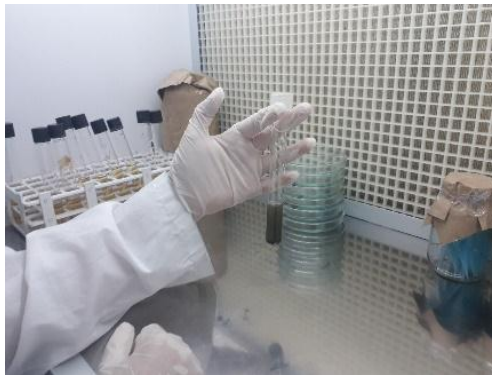
Diluciones 10^9 con agua peptonada



Enriquecimiento de la muestra con agua peptonada en cámara de anaerobiosis



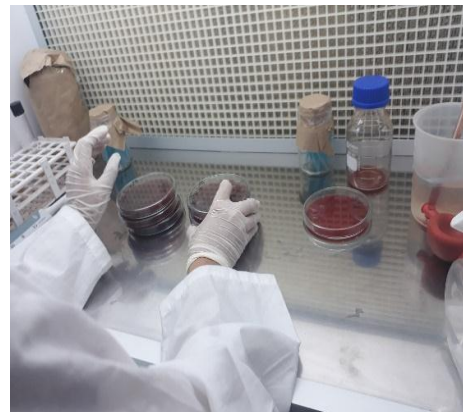
Diluciones a partir del tubo madre



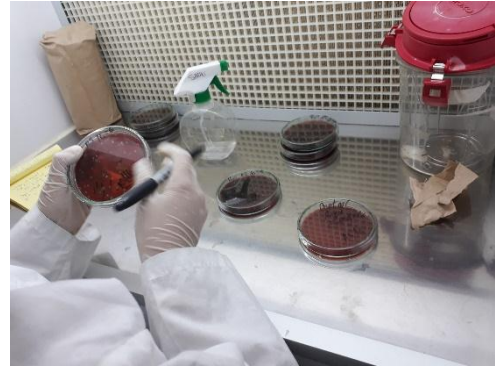
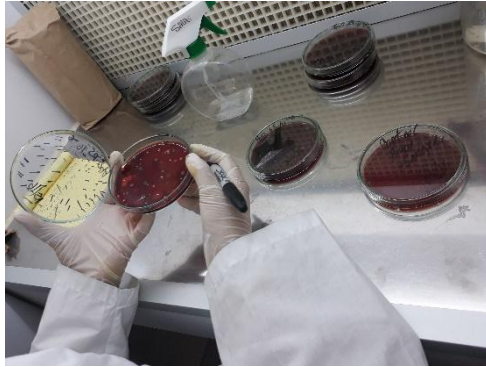
Diluciones a partir del tubo madre



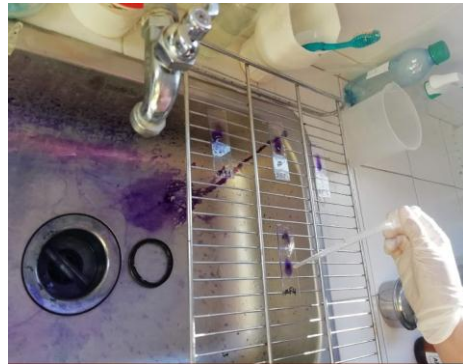
Preparación del agar sangre, aplicación a las cajas de Petri e



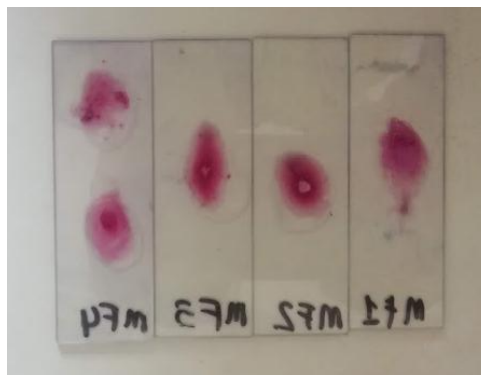
Identificación de morfotipos



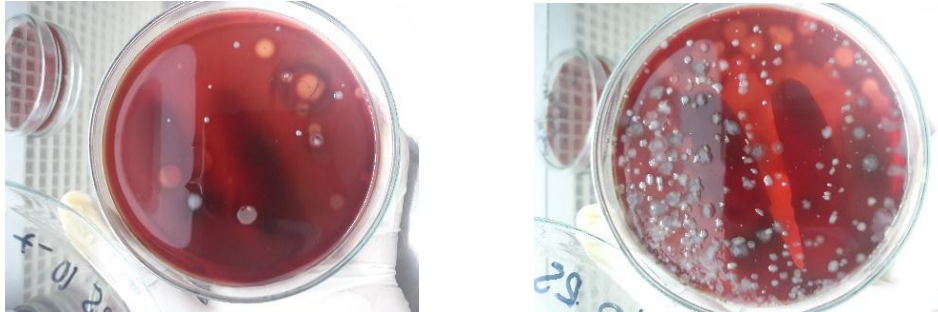
Tinción de Gram



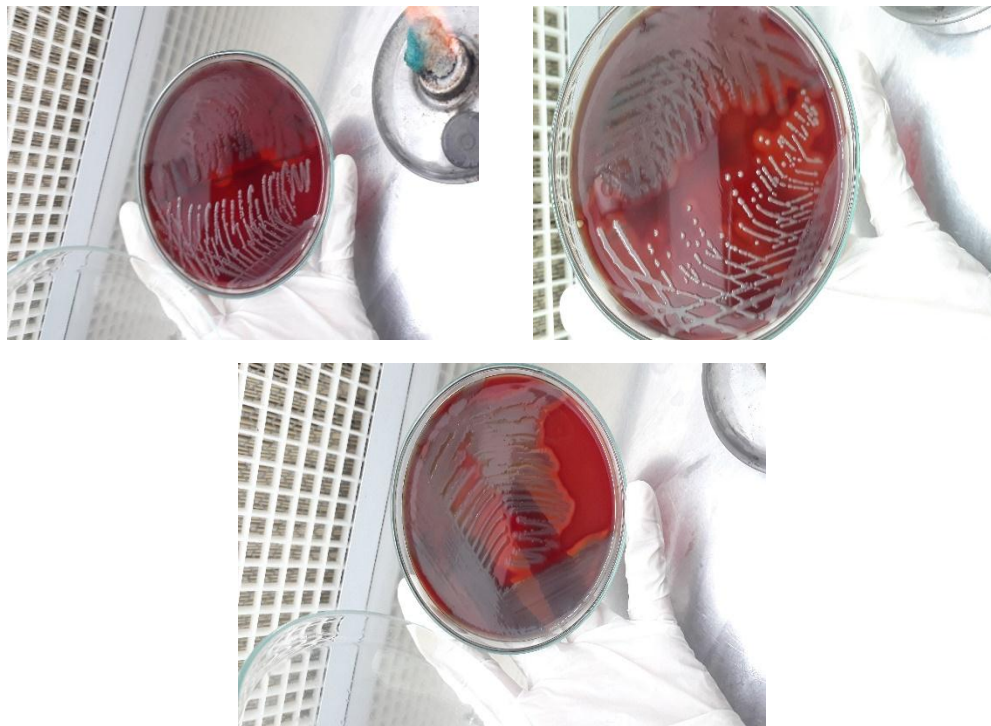
Morfotipos



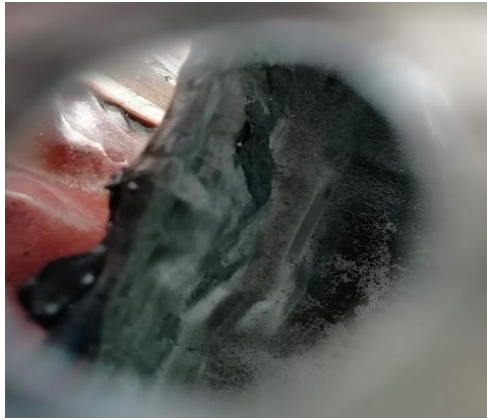
Formación de colonias



Purificación de colonias



Parte interna y externa de la CCM



Anexo F. Planos CCM en el software AUTOCAD.

