



Pontificia Universidad Católica del Ecuador

Sede Ibarra

ESCUELA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS Y AMBIENTALES “ECAA”

INFORME FINAL DEL PROYECTO

TEMA:

“Evaluación de la Bacteria *Geobacter sp.* en el Tratamiento del Agua Residual del Camal de Otavalo”

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES Y ECODESARROLLO

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN:

Línea 4. Gestión Sostenible y Aprovechamiento de los Recursos Naturales

Sublínea. Desarrollo y Sostenibilidad

AUTORA: MELANY ALEJANDRA CEVALLOS VILLACRESES

ASESOR: Mgs. SANTIAGO XAVIER MAFLA ANDRADE

IBARRA, DICIEMBRE – 2019



Ibarra, 11 de diciembre del 2019

Mgs. Santiago Xavier Mafla Andrade
ASESOR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final de investigación, el mismo que se ajusta a las normas vigentes en la Escuela de Ciencias Agrícolas y Ambientales (ECAA), de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra (PUCESI); en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f:) 

Mgs. Santiago Xavier Mafla Andrade

C.C.: 100265839-9



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

El jurado examinador, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra (PUCESI):

(f): 

Mgs. Santiago Xavier Mafla Andrade

C.C.: 100265839-9

(f): 

Mgs. Moraima Cristina Mera Aguas

C.C.: 100174372-1

(f): 

Mgs. Diego Manuel León Tapia

Mgs. Diego Manuel León Tapia

C.C.: 171166889-5



ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS

Yo Melany Alejandra Cevallos Villacreses, declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 165 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, que manifiesta textualmente: “Se reconoce facultad de los autores y demás titulares de derechos de disponer de sus derechos o autorizar las utilidades de sus obras o prestaciones, a título gratuito u oneroso, según las condiciones que determinen. Esta facultad podrá ejercerse mediante licencias libres, abiertas y otros modelos alternativos de licenciamiento o la renuncia”.

Ibarra, 11 de diciembre del 2019

f): 

Melany Alejandra Cevallos Villacreses

C.C.: 100453012-5



AUTORÍA

Yo, Melany Alejandra Cevallos Villacreses, portador de la cédula de ciudadanía N° 1004530125, declaro que la presente investigación es de total responsabilidad del autor y eximo expresamente a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra de posibles reclamos o acciones legales.

f): 

Melany Alejandra Cevallos Villacreses

C.C.:100453012-5



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo: Melany Alejandra Cevallos Villacreses, con CC: 1004530125, autor del trabajo de grado intitulado: “Evaluación de la bacteria *Geobacter sp.* en el tratamiento del agua residual del camal de Otavalo”, previo a la obtención del título profesional de “Ingeniera en Ciencias Ambientales y Ecodesarrollo”, en la Escuela de Ciencias Agrícolas y Ambientales.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tiene la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede- Ibarra, de conformidad con el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra a difundir a través de sitio web de la Biblioteca de la PUCESI el referido trabajo de graduación, respetando las políticas de propiedad intelectual de Universidad.

Ibarra, 11 de diciembre del 2019

(f.) 
.....
Melany Alejandra Cevallos Villacreses

C.C. 100453012-5



DECLARACIÓN DE COMPORTAMIENTO ÉTICO

Por medio de la presente declaro conocer y aplicar en la elaboración, desarrollo y evaluación del Proyecto de Titulación: **“Evaluación de la bacteria *Geobacter sp.* para el tratamiento del agua residual del camal de Otavalo”** lo propuesto en el Código de Ética de la Investigación y el Aprendizaje de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, aprobado por el Consejo Superior de la PUCE con fecha 11 de diciembre del 2019.

Ibarra, 11 de diciembre del 2019

(f.) 

Melany Alejandra Cevallos Villacreses

C.C.100453012-5

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por guiarme en cada paso que he dado y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mi padre y madre que han sabido formarme con buenos hábitos y valores, lo cual me ha ayudado a salir adelante, brindarme la confianza, consejos, oportunidad y recursos para lograrlo.

A mis amigos en especial aquella persona que siempre está guiándome, apoyándome y aconsejándome para que pueda cumplir cada meta que me proponga.

A mi hermano y hermana, a mi familia en general, porque me han brindado su apoyo incondicional y por compartir conmigo buenos y malos momentos.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por guiarme en cada paso para hacer lo correcto y permitirme lograr esta meta.

Agradezco a mi padre y mi madre que siempre me apoyan y que me dan la motivación necesaria para seguir luchando por mis sueños, muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye a este.

Agradezco a mi asesor el Mgs. Santiago Mafla por haberme guiado en el proceso de realizar la tesis, también a todos los docentes que formaron parte de mi progreso de aprendizaje a lo largo de la carrera universitaria.

Y por último agradezco a todos mis amigos que estaban presentes en mi vida universitaria, ya que con ellos se pasó momentos buenos y difíciles.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO I	3
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO II.....	5
OBJETIVOS	5
2.1 Objetivo General.....	5
2.2 Objetivos Específicos	5
CAPÍTULO III	6
ESTADO DEL ARTE	6
3.1. Problemática de las aguas residuales.....	6
3.1.1.Aguas Residuales.....	6
3.1.2.Clasificación de aguas residuales	6
3.2.Agua residual de camales	7
3.2.1.Características de las aguas residuales de camales.....	7
3.2.2.Parámetros a evaluar en aguas residuales de camales	8
3.2.3.Camal Municipal de Otavalo.....	9
3.3.Tratamientos de las aguas residuales.....	9
3.3.1.Tratamiento convencional	10
3.3.2.Tratamiento no convencional	10
3.4.Bioelectricidad.....	10
3.5.Microorganismos Bioelectrogénicos	11

3.6.Bacteria Geobacter sp.....	13
3.6.1.Descripción general.....	13
3.6.2.Hábitat..	14
3.6.3.Metabolismo	14
3.7.Celdas de combustible microbiana.....	15
3.7.1.Principio de una celda de combustible microbiana	15
3.7.2.Diseños disponibles para las celdas de combustibles microbianas	17
3.7.3.Desempeño eléctrico de las celdas de combustible microbiana	18
3.7.4.Transferencia extracelular de electrones	20
3.7.5.Inóculos utilizados.....	20
3.7.6.Sustratos empleados en las celdas de combustible microbiana.....	22
3.7.7.Parámetros de operación.....	22
3.7.8.Aplicaciones de las celdas de combustible microbiana.....	24
3.7.9.Ventajas de las celdas de combustible microbianas	24
CAPÍTULO IV	26
MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
4.1.Materiales de campo.....	26
4.2.Materiales y equipos de laboratorio.....	26
4.2.1. Materiales	26
4.2.2.Equipos	27
4.2.3.Reactivos	27
4.2.4.Materiales de Oficina.....	28
4.2.5.Insumo de Análisis	28
4.3.Métodos	28
4.3.1.Toma de muestras	28

4.3.2.Caracterización del agua residual del camal de Otavalo	29
4.3.3.Preparación de los electrodos	31
4.3.4.Preparación del biofilm	32
4.3.5.Construcción de la celda de combustible microbiana	33
4.3.6.Evaluación de las celdas de combustible microbianas	34
4.3.7.Análisis Estadístico y Diseño experimental	35
CAPÍTULO V	38
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
5.1.Caracterización del agua residual del Camal de Otavalo	38
5.2.Evaluación de las celdas de combustible microbianas	39
5.2.1.Voltaje...	39
5.2.2.Intensidad de Corriente (mA)	49
5.2.3.Densidad de Potencia.....	51
5.2.4.Demanda Química de Oxígeno	54
5.2.5.Eficiencia de remoción de DQO.....	56
5.2.6.pH.....	57
5.2.7.Conductividad eléctrica.....	57
5.2.8.Turbidez.....	58
5.2.9.Sólidos Totales	58
5.2.10.Demanda biológica de oxígeno	58
5.3. Socialización de la investigación.....	58
CAPÍTULO VI	61
CONCLUSIONES.....	61
CAPÍTULO VII.....	62
RECOMENDACIONES	62

CAPÍTULO VIII	63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
CAPÍTULO IX	69
ANEXOS	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Trabajos publicados sobre celdas de combustible microbianas.....	21
Tabla 2. Análisis de variables en estudio.....	35
Tabla 3. Variables en estudio.....	36
Tabla 4. Tratamientos aplicados.....	37
Tabla 5. Caracterización del agua residual del camal de Otavalo.....	38
Tabla 6. Resultados de voltaje del tratamiento 1.....	39
Tabla 7. Resultados de voltaje del tratamiento 2.....	40
Tabla 8. Resultados de voltaje del tratamiento 3.....	41
Tabla 9. Resultados de voltaje del tratamiento 4.....	42
Tabla 10. Resultados de voltaje del tratamiento 5.....	43
Tabla 11. Resultados de voltaje del tratamiento 6.....	44
Tabla 12. Normalidad de datos y homogeneidad de varianzas.....	48
Tabla 13. Análisis de varianza para el parámetro de voltaje.....	49
Tabla 14. Medición de Intensidad de Corriente de todos los tratamientos.....	49
Tabla 15. Normalidad de datos y homogeneidad de varianzas.....	51
Tabla 16. Análisis de varianza para el parámetro de intensidad de corriente.....	51
Tabla 17. Medición de Densidad de Potencia de todos los tratamientos.....	52
Tabla 18. Normalidad de datos y homogeneidad de varianzas.....	53
Tabla 19. Análisis de varianza para el parámetro de densidad de potencia.....	54
Tabla 20. Medición de la demanda química de oxígeno.....	54

Tabla 21. Normalidad de datos y homogeneidad de varianzas.....	55
Tabla 22. Análisis de varianza para el parámetro de DQO.....	55
Tabla 23. Porcentaje de remoción de DQO.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Conexiones intercelulares características de microorganismos bioelectrogénicos sobre electrodo de grafito.....	13
Figura 2. Estructura externa y Pili de una célula del género Geobacter.....	14
Figura 3. Detalles principales de una CCM de cámara doble.....	16
Figura 4. Agua residual del camal de Otavalo.....	29
Figura 5. Electrodo de grafito tratados	32
Figura 6. Preparación de biofilm.....	33
Figura 7. Celda de combustible microbiana.....	34
Figura 8. Medición promedio de voltaje del tratamiento 1.....	40
Figura 9. Medición promedio de voltaje del tratamiento 2.....	41
Figura 10. Medición promedio de voltaje del tratamiento 3.....	42
Figura 11. Medición promedio de voltaje del tratamiento 4.....	43
Figura 12. Medición promedio de voltaje del tratamiento 5.....	44
Figura 13. Medición promedio de voltaje del tratamiento 6.....	45
Figura 14. Medición promedio de voltaje de todos los tratamientos.....	46
Figura 15. Medición promedio de intensidad de corriente (mA) de todos los tratamientos.	50
Figura 16. Medición promedio de densidad de potencia (mWm^{-2}) de todos los tratamientos.	52
Figura 17. Medición promedio de Porcentaje de Remoción de DQO.....	56

Figura 18. Resultados de la organización del evento de la socialización.....	59
Figura 19. Resultados de la ejecución del evento por parte del expositor.....	60
Figura 20. Resultados de la medición de impacto de la investigación.....	60

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Oficio de aceptación de la toma de muestras en el camal de Otavalo.....	69
Anexo 2. Tratamiento de electrodos.	70
Anexo 3. Preparación de la solución para el puente salino.....	70
Anexo 4. Crecimiento del biofilm.....	71
Anexo 5. Filtración del agua residual del camal de Otavalo.....	71
Anexo 6. Celdas de combustible microbianas de 500 ml.....	71
Anexo 7. Medición del parámetro de DQO.....	72
Anexo 8. Socialización de la investigación.....	72
Anexo 9. Encuesta de la socialización de la investigación.....	73
Anexo 10. Listado de participantes presentes en la socialización de la investigación.....	74

RESUMEN

Las aguas residuales de los camales o mataderos representan un grave problema ambiental debido a que están constituidas principalmente de altas cargas orgánicas que se liberan a ríos, provocando elevados niveles de contaminación en los mismos. Algunos microorganismos, como las bacterias, son capaces de degradar esa materia orgánica y producir energía renovable sin daño al ambiente. Las celdas de combustible microbianas ofrecen la posibilidad de convertir compuestos orgánicos en electricidad mediante el metabolismo de dichos microorganismos al crear subproductos, entre los que están diferentes iones que son liberados hacia el medio extracelular. En estos dispositivos se coloca un electrodo comoceptor final para captar los electrones que liberan los microorganismos al degradar la materia orgánica.

En el presente trabajo se evaluó la bacteria *Geobacter sp.* en el tratamiento de agua residual del camal de Otavalo mediante la construcción de celdas de combustible microbianas, aplicando seis tratamientos, que consistieron en: T1 (2% de bacteria y 250ml de sustrato), T2(4% de bacteria y 250ml de sustrato), T3(6% de bacteria y 250ml de sustrato), T4(2% de bacteria y 500ml de sustrato), T5(4% de bacteria y 500ml de sustrato) y T6(6% de bacteria y 500ml de sustrato). Para la evaluación se tomaron en cuenta parámetros como el voltaje, intensidad de corriente, densidad de potencia, eficiencia de remoción de demanda química de oxígeno y pH.

Se obtuvieron los siguientes resultados, el T1 reportó el valor máximo de voltaje de 0.56 V a las 120 horas, el T5 tuvo el mayor valor de intensidad de corriente (0,0022 mA) a comparación de los demás tratamientos, al igual que en el parámetro de la densidad de potencia (0,4456 mWm⁻²). En la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno el T5 obtuvo el máximo valor de 48,9%. El pH se mantuvo entre 7 y 8 durante todo el experimento. El tratamiento 3 obtuvo resultados altos tanto en la degradación de la materia orgánica (41,22%) y al generar potencial energético (0,46 V) a las 120 horas del experimento.

Palabras clave: celdas de combustible microbianas, *Geobacter sp.*, demanda química de oxígeno.

ABSTRACT

The residual waters of the beds or slaughterhouses represent a serious environmental problem because they are constituted mainly of high organic loads that are released to rivers, causing high levels of contamination in them. Some microorganisms, such as bacteria, are capable of degrading that organic matter and producing renewable energy without damaging the environment. Microbial fuel cells offer the possibility of converting organic compounds into electricity by metabolizing these microorganisms by creating by-products, among which are different ions that are released into the extracellular environment. In these devices an electrode is placed as the final acceptor to capture the electrons released by microorganisms by degrading organic matter.

In the present work the bacterium *Geobacter* sp. in the treatment of residual water of the Otavalo channel through the construction of microbial fuel cells, applying six treatments, which consisted of: T1 (2% of bacteria and 250ml of substrate), T2 (4% of bacteria and 250ml of substrate), T3 (6% of bacteria and 250ml of substrate), T4 (2% of bacteria and 500ml of substrate), T5 (4% of bacteria and 500ml of substrate) and T6 (6% of bacteria and 500ml of substrate). For the evaluation, parameters such as voltage, current intensity, power density, chemical oxygen demand removal efficiency and pH were taken into account.

The following results were obtained, the T1 reported the maximum voltage value of 0.56 V at 120 hours, the T5 had the highest current intensity value (0.0022 mA) compared to the other treatments, as in the case of power density parameter (0.4456 mWm^{-2}). In the removal efficiency of the chemical oxygen demand, the T5 obtained the maximum value of 48.9%. The pH was maintained between 7 and 8 throughout the experiment. Treatment 3 obtained high results both in the degradation of organic matter (41.22%) and in generating energy potential (0.46 V) at 120 hours of the experiment.

Keywords: microbial fuel cells, *Geobacter* sp., Chemical oxygen demand.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural indispensable para el ser humano debido a que a lo largo del tiempo ha venido solventando sus necesidades en las distintas actividades cotidianas, luego de su intervención en este recurso la devuelve a ríos y lagos contaminada, por lo que se la considera un desecho es decir agua residual. Debido al aumento poblacional y al uso inadecuado del agua es necesario tener como prioridad mecanismos de mitigación ante este impacto ambiental negativo (Anguisaca, 2015).

Una de las problemáticas ambientales que posee Ecuador es que la mayor parte de los ríos y lagos de la región Sierra y Costa se encuentran contaminados, debido a las descargas de aguas residuales ya sean industriales, municipales o domésticas, provocando la degradación del recurso hídrico (Espigares y Pérez, 2010).

Uno de los grandes inconvenientes que se tiene actualmente a nivel mundial es, qué hacer con las aguas residuales, debido a que el tratamiento por métodos como la aireación, y electrocoagulación, son muy costosos, ya que involucran un gran consumo de energía (Anguisaca, 2015).

Los camales son actividades que requieren de grandes cantidades de volúmenes de agua para realizar sus procesos de faenamiento, ya que el producto debe ser lavado en diferentes etapas, además del lavado de los equipos, instalaciones, herramientas, etc. El principal componente de los desechos líquidos de esta actividad es la materia orgánica, la cual suele ser estabilizada empleando grandes cantidades de energía (Lara, 2011).

Las aguas residuales de los mataderos usan métodos de tratamiento tradicionales que son muy costosos, además de que se necesita elevadas cantidades de energía, para su depuración se necesita alrededor de 0.5 kilo Wats por hora de energía eléctrica por metro cúbico de agua residual a tratar (Lara, 2011).

En la actualidad la energía eléctrica utilizada para el consumo doméstico y para el sector industrial se obtiene a partir de centrales hidroeléctricas y principalmente de combustible

fósil (petróleo). Debido a que el petróleo es un recurso natural no renovable se ha visto la necesidad de buscar nuevas alternativas de producción de energía, esta, que a su vez sea amigable con el ambiente y que a diferencia de la combustión de los derivados del petróleo no produzcan contaminantes (Anguisaca, 2015).

Por estos motivos es necesario investigar tecnologías alternativas para que el agua residual sea un recurso renovable, actualmente se está investigando posibles métodos para la conversión de energía bioquímica a energía eléctrica durante el tratamiento de aguas residuales, aprovechando el carácter electrogénico de algunas bacterias mediante el cual se podría obtener buenos rendimientos (Anguisaca, 2015).

Entre las técnicas se destaca las celdas de combustible microbiológicas, que son definidas como dispositivos que convierten la energía química disponible en un sustrato biodegradable en energía eléctrica por medio de las reacciones metabólicas que llevan a cabo los microorganismos, transfieren electrones desde un donante (materia orgánica presente en agua residual) hasta un aceptor de electrones (electrodo) (González, 2015).

En una celda de combustible microbiológica los microorganismos no transfieren directamente los electrones producidos a un aceptor final, sino que estos son desviados a un electrodo, esta transferencia puede ocurrir de distintas formas, a través de la membrana celular o por medio de un mediador soluble y los electrones fluyen por un circuito externo. Cuando los electrones fluyen por este circuito externo es cuando pueden ser captados y convertidos en energía eléctrica (López, 2014).

En esta investigación se construyó celdas de combustible microbianas para evaluar el rendimiento de la bacteria *Geobacter sp.* en el tratamiento del agua residual del camal de Otavalo. Esta es una tecnología que podrá contribuir a la solución de problemas ambientales que afronta la sociedad: la crisis energética y la disponibilidad de agua limpia, y es una opción viable para el tratamiento de aguas residuales generando energía eléctrica a partir de la degradación de la materia orgánica (Falcón et al., 2009).

CAPÍTULO II

OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar el rendimiento de la bacteria *Geobacter sp.* en el tratamiento del agua residual del camal de Otavalo utilizando celdas de combustible microbianas a escala de laboratorio para la producción de energía eléctrica y la remoción de la carga contaminante.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar físico y químicamente el agua residual mediante análisis de laboratorio para la evaluación de la calidad del agua.
- Construir la celda de combustible microbiano a escala de laboratorio empleando agua residual como combustible para el tratamiento de la misma y la generación de energía eléctrica.
- Establecer el potencial energético generado durante la degradación de la materia orgánica usando un sensor de interface de voltaje y multímetro para la valoración de las celdas de combustible microbianas.
- Socializar la investigación a estudiantes, docentes de la PUCE-SI y personas interesadas.

CAPÍTULO III

ESTADO DEL ARTE

3.1. Problemática de las aguas residuales

El crecimiento demográfico y la generación de grandes cantidades de volúmenes de aguas residuales, particularmente en las zonas urbanas, están provocando alteraciones ecológicas, deteriorando gradualmente los recursos naturales del entorno (Rodríguez, 2000).

La insuficiente infraestructura con que se cuenta para el tratamiento de las aguas residuales, asociado al inadecuado manejo de aguas crudas representa un serio riesgo no solo a los habitantes de las zonas marginales, por donde circulan estas aguas, sino a la sociedad. Adicionalmente a lo anterior, otro aspecto que también conviene resaltar, es que ríos y arroyos, son comúnmente utilizados como cuerpos receptores de las aguas residuales, situación que genera problemas de contaminación y degradación de la calidad del agua (Rodríguez, 2000).

3.1.1. Aguas Residuales

“Las aguas residuales se pueden definir como aquellas que, por uso del hombre, representan un peligro y deben ser desechadas, porque contienen gran cantidad de sustancias y/o microorganismos” (Espigares y Pérez, 2010).

3.1.2 Clasificación de aguas residuales

Aguas residuales urbanas: Proceden de servicios domésticos, públicos, locales comerciales, su composición es 99% agua mezclada con contaminantes orgánicos (fecales) e inorgánicos, organismos patógenos y productos químicos que se utilizan en la limpieza. Todos estos contaminantes se los puede medir por medio de la demanda química de oxígeno y demanda biológica de oxígeno. Cuando este tipo de agua no es debidamente tratada genera graves problemas de contaminación, por lo que es importante brindarles un tratamiento adecuado (González, 2015).

Aguas residuales industriales: Son todas las aguas vertidas desde locales de actividades comerciales e industriales. En la actividad industrial se necesita agua para diferentes

procesos, por lo tanto, el agua residual está formada por líquidos residuales, aguas de proceso y aguas de drenaje (González, 2015).

Aguas residuales ganaderas y agrícolas: Las aguas residuales agrícolas están compuestas por plaguicidas, fertilizantes, abonos, pesticidas, nitrógeno, fósforo, azufre y trazas de elementos organoclorados. La composición de las aguas ganaderas procede de los restos orgánicos y materia orgánica (González, 2015).

3.2 Agua residual de camales

Las aguas residuales de los camales se caracterizan por tener una alta concentración de materia orgánica, la cual al ser descargada a los cuerpos hídricos provoca graves problemas de contaminación que se evidencia en la ausencia de oxígeno disuelto en las aguas y en malos olores. Su nivel de contaminación varía según el número de animales faenados diariamente y por la presencia de heces, sangre, pelusas y de residuos de carne (González, 2015).

3.2.1 Características de las aguas residuales de camales

A continuación, se detalla las aguas residuales generadas en cada una de las etapas de los procesos de faenamiento:

Recepción de ganado y lavado de camiones: el agua residual está compuesta por restos de productos de limpieza y restos orgánicos es decir las heces y orinas de los animales (Ruíz, 2011).

Estabulación: el agua residual se compone por compuestos nitrogenados en altas concentraciones debido a la orina y heces de los animales (Ruíz, 2011).

Aturdido: en esta etapa el animal va a producir una gran cantidad de orina, por lo tanto, el agua tendrá compuestos nitrogenados (Ruíz, 2011).

Sangrado: esta operación le confiere al agua una alta carga en materia orgánica. La sangre cruda del animal tiene una demanda química de oxígeno de 200 000 mg/L (Ruíz, 2011).

Escaldado (porcino): las aguas residuales procedentes de esta etapa contienen grasas, sólidos en suspensión, proteínas, sangre y excrementos (Carrión, 2008).

Depilado (porcino): el agua residual tiene restos de pelos, por lo tanto, incrementa la materia orgánica (Carrión, 2008).

Chamuscado (porcino): el agua posee restos de pelos, escamas de piel, etc (Carrión, 2008).

Eviscerado y lavado: este proceso se lo realiza en los canales por lo que las aguas residuales contienen alta carga orgánica (Ruíz, 2011).

Triperías: en esta etapa se realiza el lavado de estómagos, lo que conlleva a que el agua contenga restos del contenido digestivo, grasas, etc (Ruíz, 2011).

Lavado: las aguas residuales están compuestas por sustancias orgánicas, grasas y restos de detergentes (Ruíz, 2011).

3.2.2 Parámetros a evaluar en aguas residuales de camales

Al camal se le considera una industria manufacturera dedicada a la producción, procesamiento y conservación de carne y productos cárnicos. En el anexo 1 del libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente se describe los parámetros a evaluar procedentes de este tipo de industria y son los siguientes:

Caudal: Es el volumen de agua que pasa a través de una sección por unidad de tiempo (TULSMA, 2019).

Demanda Bioquímica de Oxígeno: Es la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para degradar la materia orgánica que existe en una muestra de agua (TULSMA, 2019).

Demanda Química de Oxígeno: Se determina la cantidad de oxígeno necesario para oxidar químicamente la materia orgánica existente en el agua mediante medios químicos (TULSMA,2019).

Sólidos Suspendidos Totales: Son partículas pequeñas que se encuentran flotando en el agua, lo que causa la interferencia del paso de luz (TULSMA,2019).

Tensoactivos: Son detergentes que se originan por las operaciones de limpieza y en el agua provocan la disminución de la solubilidad del oxígeno (TULSMA,2019).

Grasas y aceites: Son compuestos orgánicos constituidos por grasas de origen animal, vegetal e hidrocarburos, estos provocan la formación de natas en la superficie de agua (TULSMA,2019).

Cloruros: Los niveles altos de cloruros modifica el sabor del agua e incluso puede llegar a matar a la vegetación y corroer las conducciones (TULSMA,2019).

Sulfatos: Los niveles altos de sulfatos provocan un sabor amargo en el agua y alteran los procesos de tratamientos biológicos (TULSMA,2019).

3.2.3 Camal Municipal de Otavalo

El Camal Municipal de Otavalo cumple un papel muy importante en la transformación de materias primas de origen animal (ganado vacuno) para obtener mejores productos alimenticios (carne) y subproductos útiles a la población (patas, cueros, cabezas, menudos) bajo supervisión veterinaria para así garantizar que antes, durante y después del faenamiento se cumplan con todas las normas de seguridad, higiene y manejo del producto cárnico asegurando al consumidor un producto de calidad. A la fecha el Camal se encuentra semi-aislado y está ubicado a un lado del ingreso a la Ciudadela Ángel Escobar Paredes en la calle Santa María y Circunvalación al nor-occidente de la ciudad de Otavalo, fue construido hace aproximadamente 30 años (Escola, 2018).

El camal municipal se encuentra regularizado ambientalmente por el Gobierno Provincial de Imbabura, quien realiza el control y seguimiento del cumplimiento de la normativa; además, cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales, para la reducción de la carga orgánica y mitigar los impactos ambientales de esta actividad (Escola, 2018).

3.3 Tratamientos de las aguas residuales

El objetivo de los tratamientos de las aguas residuales es reducir el nivel de contaminación de los efluentes hasta alcanzar valores máximos permisibles que se encuentran en las normas, mediante procesos físicos, químicos y biológicos. Los principales contaminantes que se debe remover es los sólidos, materia orgánica y microorganismos (Curipallo, 2017).

El tratamiento de las aguas residuales involucra una serie de pasos, cada uno de gran importancia en el proceso de depuración del agua de contaminantes. Dependiendo del método que use la planta de tratamiento de aguas residuales, ya sean convencionales o no convencionales, las etapas pueden variar ligeramente (Bassante,2018).

3.3.1 Tratamiento convencional

El tratamiento se puede realizar por medio de tres etapas: primaria en donde se eliminan los sólidos suspendidos y sedimentables mediante cribas, sedimentadores, trampas de grasas y desarenadores, secundaria se usan procesos biológicos para eliminar la materia orgánica y la última etapa terciaria se utiliza cuando no se ha eliminado los contaminantes en la etapa secundaria y se emplean procesos físicos, químicos, biológicos y electroquímicos (Curipallo, 2017).

También implementa procesos unitarios básicos como pre-sedimentación, coagulación, floculación, clarificación, filtración y desinfección empleando tecnología y procedimientos de operación conocida (Bassante, 2018).

3.3.2 Tratamiento no convencional

Tratan de remediar aguas contaminadas con fármacos y otras moléculas hidrofílicas con estructuras químicas complejas difíciles de eliminar con los tratamientos convencionales. Entre los tratamientos no convencionales se puede nombrar a oxidaciones avanzadas como la ozonización o la fotocatalisis, ultrasonido, cavitación acústica, entre otros (Bassante, 2018).

3.4 Bioelectricidad

Se define a la bioelectricidad o bioelectrogénesis como la generación de energía eléctrica mediante los procesos metabólicos de ciertos seres vivos. Es una técnica con un gran potencial para producir energía de forma más eficaz, barata y contamina menos (Hernández y Sánchez, 2017).

La bioelectricidad se utiliza para el tratamiento de aguas residuales ya que mediante ciertas bacterias se puede oxidar la materia orgánica o cualquier desecho biodegradable y transmitir

los electrones generados a una superficie conductora para conseguir energía (Troncoso, 2016).

Es una tecnología que convierte el agua residual en energía, por lo tanto, tiene varias ventajas, minimización de costos en la inversión energética para la depuración del agua residual, es un tratamiento más eficaz ya que genera menor cantidad de fangos y reduce el tiempo invertido en el mismo (Troncoso, 2016).

“A la bioelectricidad se la puede estudiar desde dos puntos de vista: como fuente de energía eléctrica en el interior de las células y como corriente electrolítica debido a los campos eléctricos en el exterior de la célula” (Puican, 2010).

En 1910 Michael Cresse Potter, demostró con un experimento la producción de energía eléctrica con cultivos de *E. coli* y *Saccharomyces*, utilizando electrodos de platino. En 1931 Cohen realizó celdas de combustibles microbianas con lo que consiguió mayor voltaje que en el anterior experimento. En la década de los 80 se utilizaron mediadores redox solubles lo que tuvo mejores resultados (Anguisaca, 2015).

En el año 2008 Abraham Esteve Nuñez realizó un trabajo titulado bacterias productoras de electricidad que consiste en identificar los diferentes tipos de bacterias que contribuyen a la producción de energía mediante el metabolismo de la materia orgánica. En el estudio se ha demostrado que cuando se utiliza pilas sedimentarias se identifica a las δ -proteobacterias, y a la familia Geobacteraceae como los microorganismos dominantes (Núñez, 2008).

3.5 Microorganismos Bioelectrogénicos

Existen muchos microorganismos que pueden ser eficientes a la hora de realizar dicho proceso de conversión energética, pero algunos lo son más que otros. Los microorganismos más utilizados en los procesos de generación de energía eléctrica son las llamadas “bacterias electrogénicas” que suelen encontrarse en ambientes anaerobios como sedimentos de lagos o ríos (De la Vega, 2009).

Los microorganismos bioelectrogénicos se caracterizan por ser anaerobios y en su proceso de respiración utilizar aceptores como son los óxidos de hierro, manganeso entre otros y crecer con un electrodo por lo que pueden generar energía eléctrica (Busalmen, 2010).

Lovley (2006), afirma que estos microorganismos “son capaces de transferir electrones al ánodo en ausencia de mediadores redox artificiales”, lo que conlleva a que se elimine la toxicidad en las celdas de combustible microbiana y como combustible se utiliza compuestos orgánicos.

Para realizar este proceso se necesita de un medio favorable para que el microorganismo pueda oxidar la materia orgánica y reduzca los iones metálicos, teniendo la posibilidad de que se pueda eliminar el exceso de electrones que se generan en el proceso catabólico a partir de la liberación de energía. La respiración de hierro en estado oxidado se realiza cuando la materia orgánica es oxidada por este ion y se libera electrones es decir energía que se quedan temporalmente retenidos dentro de los microorganismos (Hernández y Sánchez, 2017).

Un ejemplo de los microorganismos bioelectrogenicos es la bacteria *Shewanella ioihica*. En las investigaciones de Nakamura y Hashimoto (2009), se destaca;

La corriente generada durante la respiración anaerobia de $-Fe^2O^3$ (el $\alpha-Fe^2O^3$, es la forma del óxido de hierro III en fase alfa, que tiene que ver con la estructura (acomodo) de los átomos del compuesto, tiene forma romboédrica; más común de la hematita, que es la forma mineral del Fe^2O^3) por este microorganismo, cuando el óxido de Fe^{3+} se encuentra en solución coloidal (sistema formado por dos o más fases, principalmente por una líquida y por una sólida), se “conecta” mediante los pili (Plural de pilum, que quiere decir “pelo”, estructura en la membrana externa de ciertos microorganismos), que se piensa son conductores naturales de electrones que posee este organismo (figura 1).

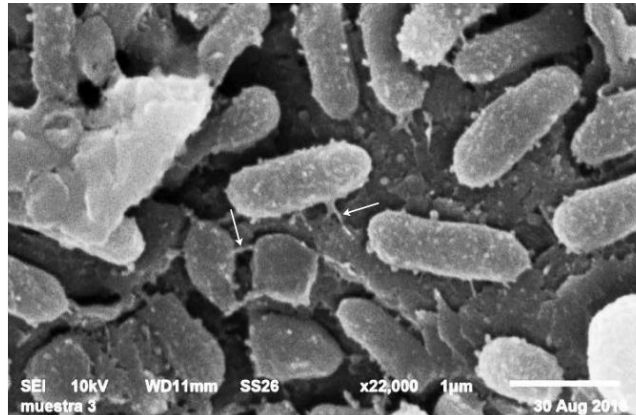


Figura 1: Conexiones intercelulares características de microorganismos bioelectrogénicos sobre electrodo de grafito. (Hernández y Sánchez, 2017)

Se puede distinguir dos tipos de bacterias electrogénicas, las que producen sus propios mediadores redox para reaccionar con el electrodo y las que no necesitan de mediador para la interacción directa con el electrodo.

El principal representante del grupo que producen sus propios mediadores son las bacterias del género *Shewanella*, son reductoras de Fe (III), también se las considera a las bacterias *Rhodospirillum rubrum*, *Aeromonas hydrophila*, *Clostridium butyricum* y *Enterococcus gallinarum*. El género *Geobacter* representa al grupo que no necesita de mediadores (Ríos, 2016).

3.6 Bacteria *Geobacter* sp.

La bacteria *Geobacter* sp. es de vital importancia para el ciclo natural de la materia orgánica y de los metales en los subsuelos y sedimentos acuáticos y en la biorremediación debido a que es capaz de transferir electrones a moléculas que son formadas por la degradación de los restos de las plantas y animales y a los electrodos de forma directa para generar electricidad. Además, pueden fabricar Pili para el desarrollo de dispositivos para la industria microelectrónica (Romero et al., 2012).

3.6.1 Descripción general

Son bacterias que se caracterizan por ser Gram-negativas, tener forma recta o ligeramente curvada, dos tipos de apéndices, flagelos y Pili.

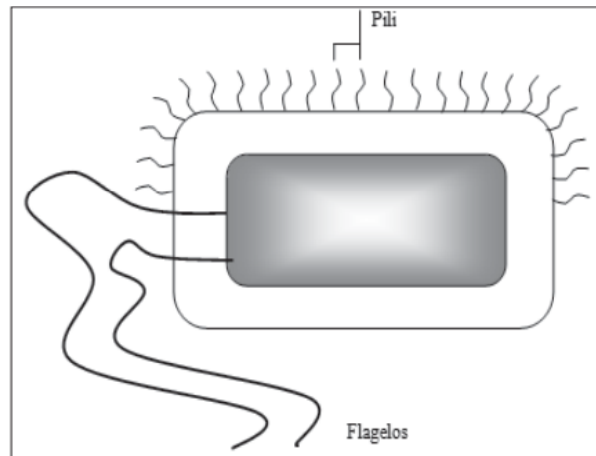


Figura 2: Estructura externa y Pili de una célula del género *Geobacter*. (Romero, Vásquez y González, 2012)

El flagelo es de gran importancia ya que permite buscar metales, al igual que el Pili debido a que su función es transferir los electrones hasta los metales o electrodos, ya que son estructuras eléctricamente conductoras (Romero et al., 2012).

3.6.2 Hábitat

Se las puede encontrar en ambientes ricos en nitratos, sulfatos y sin oxígeno, es decir en lugares subterráneos, acuíferos y sedimentos de sal de pantano, marinos y de agua dulce (Romero et al., 2012).

3.6.3 Metabolismo

El metabolismo de la bacteria *Geobacter sp.* necesita de compuestos orgánicos y carbono para poder crecer y desarrollarse, y a la vez como fuente de energía.

Según Romero et al. (2012), la bacteria posee una red de citocromos tipo C multihemo, funciona como transporte electrónico y vincula la membrana interna, el periplasma y la membrana externa, para transferir los electrones desde una sustancia que es oxidada a otra que acepta electrones. Además, almacena energía para mantener la célula activa para buscar nuevos aceptores de electrones. Para la obtención de electrones se utiliza la respiración, la cual aplica el ciclo de Krebs y oxida la materia orgánica hasta producir dióxido de carbono, agua, energía (electrones) y ATP.

3.7 Celdas de combustible microbiana

Una celda de combustible es un dispositivo que transforma energía química en corriente eléctrica a través del acoplamiento de reacciones electroquímicas de oxidación y reducción. Para lograr el objetivo estas reacciones se producen en compartimientos separados por una membrana semipermeable, de manera que los electrones producidos en las oxidaciones circulen por un circuito externo para ser consumidos en las reducciones, esto permite aprovechar la circulación de corriente (Busalmen, 2010, p. 29).

Para realizar una celda de combustible microbiana (MFC) se necesita que en esta se encuentren microorganismos, los cuales funcionan como catalizadores, a la vez permiten que sea posible medir las reacciones redox, con el objetivo de producir energía a partir de aguas residuales o sedimentos ya que en ellas se encuentra materia orgánica. Está compuesta por una cámara anaeróbica y una aeróbica.

En la cámara anaeróbica entra el efluente que se desea tratar para que este sea oxidado por las bacterias y la cámara aeróbica tiene la función de reducir el compuesto capaz de recibir los electrones (Busalmen, 2010).

3.7.1 Principio de una celda de combustible microbiana

La celda de combustible microbiana está constituida por dos cámaras, anaeróbica (ánodo) y aeróbica (cátodo) y por un separador. En la cámara anaeróbica se encuentra el sustrato orgánico y microorganismos que generan electrones, protones y dióxido de carbono mediante la oxidación del sustrato. Cuando se liberan los electrones de la cámara anaeróbica son transferidos a la cámara aeróbica por medio de un circuito externo, los protones que se generan se trasladan a la cámara aeróbica por medio del separador para combinarse con el oxígeno y reducirse a agua. En cada cámara se encuentra un electrodo. (Revelo et al., 2013)

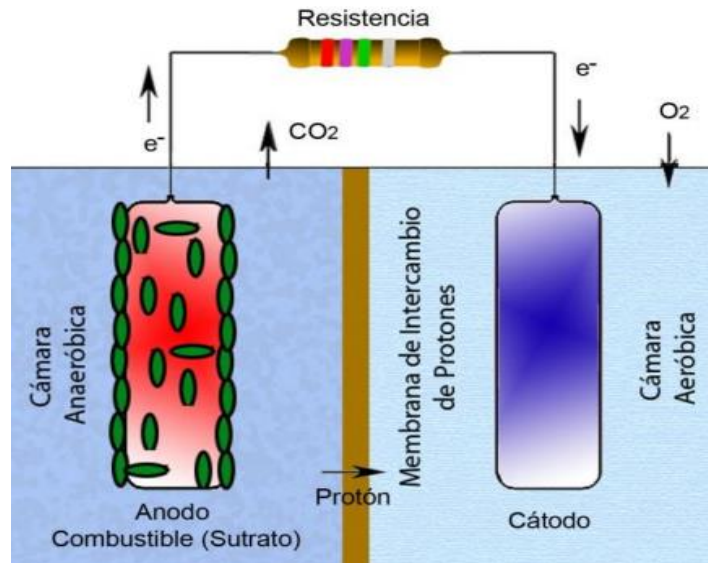


Figura 3: Detalles principales de una CCM de cámara doble. (Revelo, Hurtado y Ruiz, 2013)

Para la elaboración de la celda de combustible microbiana se puede utilizar materiales como vidrio o acrílico, para el separador existe la opción de utilizar membrana de intercambio de cationes, membrana de intercambio de aniones, membrana bipolar, membrana de microfiltración, membrana de ultrafiltración, puente salino, fibra de vidrio, membranas porosas, este elemento es de gran importancia debido a que esto impide el paso de los electrones a la cámara aeróbica. Los electrodos pueden ser de platino y grafito. (Revelo et al., 2013)

- **Ánodo**

El material para la construcción del ánodo debe ser conductor, estable químicamente en la solución del reactor y biocompatible, para lo cual el más utilizado es el grafito debido a que tiene varias ventajas, son baratos, fáciles de manipular y tiene un área de superficie definida, además se lo puede encontrar de diferentes formas como placas de grafito compacto, varillas, gránulos, material fibroso, etc. (Ríos, 2016).

- **Cátodo**

El ferricianuro es un buen aceptor experimental en las celdas de combustible microbianas, al igual que el oxígeno debido a que tiene un alto potencial de oxidación, este es el más

adecuado ya que tiene un bajo costo, por su disponibilidad y sostenibilidad. Es importante elegir bien el material ya que este afecta el rendimiento del cátodo (Ríos, 2016).

- **Membrana de intercambio de protones**

Los materiales de la membrana de intercambio de protones deben tener alta selectividad de protones, estabilidad y firmeza, entre los que más se utilizan se encuentra el nafon 117 y el ultrex (Ríos, 2016).

3.7.2 Diseños disponibles para las celdas de combustibles microbianas

Existen diferentes configuraciones de celdas de combustibles microbianas, las cuales se clasifican tomando en cuenta diferentes criterios.

- **Cámara Sencilla**

Tiene un solo compartimiento que incluye el ánodo y cátodo, ya que el cátodo está expuesto directamente al aire, lo que provoca la eliminación de la cámara catódica. En este diseño los electrodos están separados por una membrana de intercambio de protones que debe ser prensada en caliente directamente sobre el cátodo, funcionando como un electro-membrana. Estas celdas tienen un diseño simple, rentable y produce energía de una manera más eficiente que una celda de combustible microbiana de cámara doble, sin embargo, sus principales inconvenientes son la contaminación microbiana del cátodo y la difusión de oxígeno del ánodo al cátodo (Oh y Logan, 2006).

- **Cámara Doble**

Consta de dos comportamientos, la cámara anódica y la cámara catódica separadas por la membrana de intercambio de protones o por un puente salino. La celda de combustible microbiana tipo H es la más conocida y utilizada para experimentos a escala de laboratorio, se puede utilizar para estudiar parámetros básicos como el estudio de materiales nuevos o comunidades microbianas, aunque produce bajas densidades de potencia debido a su alta resistencia interna (Oh y Logan, 2006).

- **Celda de Combustible Microbiana Multicámara**

Este diseño consiste en conectar entre sí varias celdas de combustibles microbianas individuales en serie o en paralelo para aumentar la salida de energía. La conexión en paralelo genera más energía que la conexión en serie debido a que tiene mayor velocidad de reacción electroquímica (Oh y Logan, 2006).

- **Celda de Combustible Microbiana Tubular**

Este tipo de celda de combustible microbianas ha demostrado ser la más eficaz en la operación de flujo continuo, además esta configuración es la más aplicable a escala comercial, ya que produce densidades de potencia elevadas y su costo es mínimo. Las celdas de combustibles microbianas tubulares aumentan el tiempo de retención hidráulica, por lo cual se reducen costos de operación a largo plazo (Oh y Logan, 2006).

- **Celda de Combustible Microbiana Placa plana**

Es una celda de combustible de hidrogeno convencional, cuenta con una membrana de intercambio de protones, ubicada entre electrodos de papel de carbono. Los canales son perforados de modo que el flujo sigue un camino serpenteante a través del sistema (Oh y Logan, 2006).

3.7.3 Desempeño eléctrico de las celdas de combustible microbiana

Para medir el desempeño eléctrico de una celda de combustible microbiana se lo hace mediante el voltaje que es producido en la resistencia externa entre la cámara anaerobia y aerobia. Los parámetros que se evalúan son: la densidad de potencia, eficiencia coulombica y resistencia interna (Farias,2016).

- **Densidad de potencia**

Según Revelo et al. (2013), la densidad de potencia se genera por unidad de área del electrodo o por la unidad de volumen del sustrato, se calcula de la siguiente manera:

$$PA = \frac{IU}{A} \quad PV = \frac{IU}{V}$$

I = corriente en amperios

U = potencial en voltios

A = área de la superficie del electrodo anódico en m²

V = volumen del sustrato de la cámara anódica

- **Resistencia interna**

La resistencia interna se la obtiene mediante las mediciones del voltaje en la resistencia externa y analizando las curvas de polarización o por la técnica de espectroscopia de impedancias mediante la aplicación de una señal de voltaje a la celda y la medición de la corriente de la misma (Revelo et al., 2013).

- **Eficiencia coulombica**

Según Farias (2016), la eficiencia coulombica es la relación entre los electrones recuperados como corriente eléctrica y los electrones disponibles de la materia biodegradable presente en la alimentación de la celda de combustible microbiana. El cálculo de la eficiencia coulombica para la oxidación del sustrato orgánico en la cámara anódica se realiza basándose en la cantidad de la demanda química de oxígeno eliminada por el cultivo mixto en la cámara anódica y la corriente eléctrica generada. Para un agua residual, el total de coulombios obtenidos se determina integrando la corriente frente al tiempo. (p.10)

$$E_c = \frac{M_{O_2} \int^t OI(T) dt}{F b o_2 v a n \Delta D Q O}$$

M_{O₂} = Peso molecular del oxígeno (32g/mol)

$\int (I) dt$ = Coulombios reales generados en la operación de la CCM

F = Constante de Faraday (96,485 C/mol e⁻)

t = Tiempo de reacción de operación de la CCM

bo_2 = Número de moles de electrones generados por mol de oxígeno (4 mol)

v_{an} = Volumen total de la cámara anódica (L)

ΔDQO = Cantidad de DQO eliminado durante el ciclo de operación de la CCM (mg/L)

3.7.4 Transferencia extracelular de electrones

- **Transferencia de electrones desde el microorganismo al ánodo**

Los electrones se transfieren directamente al ánodo por medio de los citocromos tipo C o por conductores proteicos llamados pili que poseen las bacterias electrogénicas. Existen bacterias que no pueden transferir de forma directa los electrones debido a su membrana que no es conductiva por lo que requieren de mediadores exógenos o endógenos, los cuales se reducen mediante el proceso de oxidación metabólica de los materiales orgánicos y luego es re-oxidada para transportar los electrones al ánodo. (Revelo et al., 2013)

- **Transferencia de electrones desde el cátodo al microorganismo**

Los microorganismos electróforos son aquellos que aceptan electrones directamente de electrodos. Los electrones que se reciben del cátodo se transfieren a aceptores potenciales redox que son captados del medio como puede ser protones, dióxido de carbono, nitrato, etc. (Revelo et al., 2013).

3.7.5 Inóculos utilizados

Los inóculos más utilizados en las celdas de combustible microbianas son las de los cultivos puros de la familia Geobactereace, aunque también se han hecho estudios con consorcios microbianos presentes en las aguas residuales. Una de las ventajas de utilizar cultivos puros es que se puede estudiar las celdas de combustible microbianas con biocatalizadores, mediante el cual se puede predecir un modelo de la transferencia de los electrones (Carmona, 2008).

Tabla 1. *Trabajos publicados sobre celdas de combustible microbianas*

Celda	Inóculo	Sustrato	Operación	Membrana
Doble cámara	<i>G. sulfurreducens</i>	Acetato [5 mM]	T=30°C, Ot=960h, pH=6.8	Sin membrana
Doble cámara	<i>G. fermentans</i>	Acetato, propionato, malato, lactato y succinato [5mM]	Ot=960h	Nafion 117
Doble cámara	<i>R. ferrireducens</i>	Glucosa [2mM]	T =25°c, Ot = 1000h	Nafion 117
Doble cámara	Lodo anaerobio	Agua residual modificada	T=30°C, Ot=50h	Nafion 117
Doble cámara	Sedimento marino	Acetato [0.1 mM]	T=22°C, Ot=1920h, pH=6.8	Nafion 118

Fuente: Carmona (2008)

3.7.6 Sustratos empleados en las celdas de combustible microbiana

El empleo de sustratos en las celdas de combustible microbianas es muy importante ya que representa el combustible para generar electricidad, estos pueden ser compuestos puros hasta mezclas complejas de materia orgánica de aguas residuales. En las primeras investigaciones se utilizaron sustratos simples como glucosa, acetato, pero en la actualidad se utiliza aguas residuales de todo tipo con el objetivo de depurarlas y generar energía (Cervantes, 2011).

Los sustratos de compuestos puros tienen mayor facilidad de degradarse por lo tanto generan mayor electricidad, además, su uso en las celdas de combustible microbianas permite evaluar sus condiciones de operación. En ciertas investigaciones se ha utilizado acetato como sustrato debido a su inactividad en los procesos microbianos, otros sustratos utilizados son: glucosa, sacarosa, almidón, lactato, ácido tereftálico, tintes sintéticos, lactosa, maltosa, xilosa, formiato, propionato, ácido succínico, etanol (Ríos, 2016).

Los sustratos de mezclas complejas necesitan de comunidades microbianas electrogénicas para degradar la materia orgánica, entre estos sustratos podemos encontrar aguas residuales de procesamiento de frutas y vegetales, suero de queso, melazas de destilerías, biorrefinerías, industrias farmacéuticas y residuos agrícolas (Ríos, 2016).

3.7.7 Parámetros de operación

En una celda de combustible microbiana a escala de laboratorio la generación de energía se ve afectada debido a varios factores como son el pH, inóculo, combustible, conductividad, configuración de la CCM y temperatura.

- **pH**

Según López (2014), el valor de pH adecuado debe estar en un rango de 6 a 9, en la cámara anódica para que el biocatalizador tenga un buen desempeño.

- **Oxígeno disuelto**

La generación de electricidad en una celda de combustible microbiana es posible debido a que las bacterias se mantienen separadas del oxígeno, para lo cual se utiliza nitrógeno gaseoso en la cámara anódica (López, 2014).

- **Conductividad**

La resistencia óhmica del electrolito representa un gran porcentaje de la resistencia interna total, al incrementar la conductividad del electrolito, disminuye la resistencia óhmica y la densidad de potencia aumenta agregando NaCl a la solución anódica (López, 2014).

- **Biomasa**

López (2014), confirma que en un proceso de bio - conversión aerobio, la tasa de crecimiento es alrededor de 0.4 gramo de biomasa por gramo de DQO removido. La tasa de crecimiento en una celda de combustible microbiana suele ser baja comparada con los procesos aerobios, esta depende de varios aspectos:

- La cantidad de electrones que llegan al ánodo, es decir la energía que estos representan, la cual puede ser calculada con la siguiente formula:

$$E = P*t = V*I*t$$

E = energía

P = potencia

V = voltaje

I = corriente

t = tiempo

- La cantidad de hidrógeno formado.
- La cantidad de sustrato convertido a ácidos grasos volátiles.

- **Demanda Química de Oxígeno**

La energía teórica contenida en 1 kg de DQO, es de 1 kWh, pero en una celda de combustible microbiana teóricamente es de aproximadamente 4 kWh (López, 2014).

- **Carga Orgánica Volumétrica**

Se calcula la carga orgánica volumétrica (COV, en kg de DQO/m³ día) refiriéndose a la concentración de DQO a tratar, el flujo y el volumen de la CCM. El valor de COV es de 3kgDQO/m³ día. Estos valores de carga pueden ser normalizados con el volumen total de la

cámara anódica para compararlos con procesos de biomasa suspendida o con el área superficial anódica para compararlos con procesos de biopelícula (López, 2014).

3.7.8 Aplicaciones de las celdas de combustible microbiana

Las celdas de combustible microbianas tienen diversos usos que se pueden aplicar para solucionar problemas ambientales a nivel nacional.

- **Tratamiento de aguas residuales**

El tratamiento electroquímico de aguas residuales es una tecnología interesante debido a que produce energía eléctrica y depura el agua. Las aguas residuales de la industria, agricultura y domésticas tienen grandes cantidades de materia orgánica por lo que son ideales para este tipo de tratamiento. Las CCM generan ahorros de energía de aireación y de disposición de lodos (Farias, 2016).

- **Biosensores**

Se emplean para detectar compuestos químicos como glucosa, acetato, también pueden utilizarse para entender y modelar respuestas de los ecosistemas obteniendo respuestas del medio ambiente. Además, se puede aplicar para detectar compuestos tóxicos debido a que las bacterias tienen baja actividad metabólica cuando son inhibidas por dichos compuestos (Farias, 2016).

- **Biorremediación**

Modificando las celdas de combustibles microbianas convencionales permite llevar a cabo reacciones de remoción sin la producción eléctrica, la remediación incluye la degradación de contaminantes orgánicos en el ánodo, como la reducción de productos químicos inorgánicos en el cátodo. El tratamiento de contaminantes como hidrocarburos, selenito, fenol se puede realizar usando celdas de combustible microbianas (Farias, 2016).

3.7.9 Ventajas de las celdas de combustible microbianas

Gonzales (2015), confirma que las celdas de combustibles microbianas poseen ventajas que otras tecnologías no tienen como es en el caso de la digestión anaerobia y fermentación acidogénica, entre sus ventajas tenemos las siguientes:

- La energía que se obtiene del sustrato es directa lo que conlleva una alta eficiencia.
- La temperatura a la que operan no es problema ya que lo puede hacer a distintas, como puede ser a temperatura ambiente o bajas.
- El cátodo puede ser aireado de manera pasiva.
- Los gases que eliminan son dióxido de carbono no fósil y sin valor energético residual por lo que no necesita de ningún tratamiento.
- No necesita de energía debido a que no tiene partes móviles.
- Generan menor cantidad de fangos comparadas con otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales.

CAPÍTULO IV

MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Materiales de campo

- Cooler de plástico
- Guantes
- Mascarilla
- Botas de caucho
- Botellas ambar de 500 ml
- Cámara fotográfica Sony

4.2 Materiales y equipos de laboratorio

4.2.1. Materiales

- Crisoles 30ml
- Matraz Erlenmeyer 250ml y 500ml
- Papel aluminio
- Mechero de bunsen
- Probetas de 2ml y 5ml
- Pera
- Balón volumétrico 100 ml
- Frascos ambar
- Agitadores inmantados
- Mascarilla
- Tubo fusible
- Puntas para micropipeta de 1000 ul
- Micropipeta de 100ul
- Asa metálica
- Algodón

4.2.2 Equipos

- Termoreactor Wealtec HB-1
- Estufa VRW Utility
- Mufla Thermolyne Thermo Scientific
- Sensor DBO Oxitop Velp Cientific
- Potenciómetro Navih
- Conductímetro HANNA instrument
- Balanza digital MIDCIS
- Autoclave ICAN clave
- Cabina extractora Labconco
- Colorímetro LaMotte
- Shaker Incubator N-Biotek
- Plato agitador WiseStir MSH-20D
- Incubadora de DBO Velp Scientifica
- Analizador de DBO Oxitops Velp Scientifica
- Digital Multi-Meter E9231
- Módulo USB USB-200
- Módulo de batería BAT-202
- Sensor registrador de pH NUL-206
- Sensor registrador de voltaje NUL-201
- Sensor registrador de temperatura NUL-203

4.2.3 Reactivos

- Ácido nítrico 65% Merck
- Cloruro de potasio Merck
- Agar nutritivo Luria Bertani Merck
- Caldo Lb Luria Bertani Merck
- Agua destilada
- Kit DQO LaMotte

4.2.4 Materiales de Oficina

- Computadora Acer
- Libreta de apuntes
- Esfero
- Marcador indeleble
- Calculadora Casio
- Microsoft Excel
- Programa estadístico R.
- Programa informático Neulog

4.2.5 Insumo de Análisis

- Agua residual del camal de Otavalo
- Bacteria *Geobacter sp.* obtenida a partir de un trabajo previo realizado en los laboratorios de la PUCE-SI

4.3 Métodos

Para el desarrollo de esta investigación se ejecutaron dos fases: una de campo y otra de laboratorio. La fase de campo que consistió en la toma de muestras simples del agua residual del camal del cantón de Otavalo en la provincia de Imbabura. La fase de laboratorio se efectuó en los laboratorios de Química, Biotecnología y Microbiología de la Escuela de Ciencias Agrícolas y Ambientales de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra, en donde se realizó la caracterización de las muestras del agua residual, la preparación del crecimiento de biofilm y la construcción de las celdas de combustible microbianas.

4.3.1. Toma de muestras

La investigación se realizó en el camal del cantón Otavalo, se tomaron muestras simples del agua residual antes que entre a la planta de tratamiento (figura 4), luego se procedió a colocar la muestra en frascos ambar esterilizados de 500 ml, las que posteriormente se etiquetó.

Las muestras fueron trasladadas en un cooler plástico, con refrigerante en su interior para no alterar las condiciones de las mismas, al laboratorio de química analítica de la universidad para caracterizar físico y químicamente el agua.



Figura 4: Agua residual del camal de Otavalo

4.3.2. Caracterización del agua residual del camal de Otavalo

Para la caracterización del agua residual se realizó los análisis químicos y físicos en los laboratorios de la PUCESI, para lo cual lo primero que se efectuó fue la filtración del agua por medio de un embudo con papel filtro, luego se procedió al desarrollo de los análisis.

a) Análisis químicos y físicos

- **pH**

El agua residual filtrada se colocó en un vaso de precipitación para ser medida con el potenciómetro Navih en los laboratorios de la PUCE-SI bajo condiciones adecuadas, para lo cual se introdujo la sonda, previamente encerrado el equipo (LaMotte, 2014).

- **Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica fue medida con un conductímetro HANNA instruments en los laboratorios de la PUCE-SI, para lo cual se introdujo el sensor en la muestra de agua residual filtrada (HANNA instruments, 1995).

- **Turbiedad**

La técnica consiste en el encendido del turbidímetro 2020 *e/i* (LaMotte, 2005), la colocación del blanco preparado que tiene unidades de NTU, se cierra la tapa y se escanea luego se procede a colocar 10ml de la muestra en el tubo, se procede a limpiar el exterior para evitar una mala medida esto con la ayuda de una toalla, se coloca en el turbidímetro la muestra y se obtiene los resultados, finalmente se limpia y se apaga el equipo (LaMotte, 2014).

- **Sólidos totales**

Para determinar sólidos totales se debe tarar, esto se lo realiza pesando los crisoles y luego se mete en la estufa a 110°C se los saca y se los enfría en el decantador y se vuelve a pesar, para saber si esta tarado el crisol, el peso debe variar en un rango de ± 5 . Al crisol tarado se le añade 20 ml de la muestra y se procede a colocar en la estufa a 110°C hasta la evaporación total, se saca de la estufa, se deja enfriar en el decantador y se procede a pesar. Para los sólidos volátiles el crisol con la muestra debe ser introducido a la mufla a 550°C durante 3 horas, se saca de la mufla el crisol y se lo coloca en el decantador, una vez que este frio se procede a pesar. (Rice et al.,2017)

- **DQO (Demanda Química de Oxígeno)**

Para realizar la DQO primero se homogeniza la muestra (si es necesario), para lo cual se la debe mezclar, y mientras se prepara la muestra se precalienta el termoreactor a 150°C, se procede a remover la tapa del tubo de COD y se coloca el tubo en un ángulo de 45°, usando una pipeta graduada de 5ml se añade en las paredes del tubo con cuidado 0,2ml de la muestra. Se procede a tapar y a mezclar exhaustivamente. Se debe limpiar el exterior del tubo, esto se lo realiza únicamente con agua destilada y una toalla de papel. Para preparar el blanco se debe repetir los pasos los pasos ya descritos anteriormente, pero en esta ocasión se usa 0,2ml de agua destilada. Una vez preparada la muestra y el blanco se debe colocar los tubos en el termoreactor a la temperatura de 150°C con un tiempo de 2 horas. Cuando ha terminado el tiempo de 2 horas se debe setear el termoreactor a 120°C y esperar por 20 minutos hasta que

los tubos lleguen a dicha temperatura o menos. Una vez que ha terminado el tiempo de espera se retira los tubos del termoreactor y se invierte el tubo por varias ocasiones para mezclar. Se coloca los tubos en una gradilla a temperatura ambiente. Cuando los tubos están a temperatura ambiente se procede a medir en el colorímetro para esto se presiona en HOLD, ENTER, se ingresa al menú, se selecciona todos los test. (El blanco debe estar libre de manchas de dedos u otras suciedades que ocasionen una mala lectura, esto con una toalla de papel y agua destilada), se selecciona el código de DQO que es el 026 COD HR, se coloca el blanco en el colorímetro y se pulsa escanear blanco, se remueve el tubo y sale escanear la muestra o en ingles scan simple y se tiene la medida de DQO de la muestra (Nollet, 2007).

- **DBO5 (Demanda Biológica de Oxígeno)**

La técnica de la demanda biológica de oxígeno consiste en añadir las soluciones A que contiene 0,25g de cloruro férrico hexahidratado contenido en un litro de agua destilada, B que contiene 27,5g de cloruro de calcio anhidro contenido en un litro de agua destilada, C 22,5 g de Sulfato de magnesio Heptahidratado contenido en un litro de agua destilada y D 8,5g de difosfato monobásico de potasio 33,4 g de difosfato disódico heptahidratado 21,7 g de difosfato dipotásico y 1,7 g de Cloruro de amonio contenido en un litro de agua destilada. De cada una de las soluciones se debe añadir 1ml con la ayuda de una probeta, 14,5ml de la muestra, es importante colocar un agitador dentro de la muestra preparada, en la botella ámbar se le añade en la tapa hidróxido de sodio al ras, utilizando el sensor system se tapa y se coloca en el régimen respiratorio durante 5 días configurado a una temperatura de 20°C (VELP Scientifica, 2015).

4.3.3. Preparación de los electrodos

Se utilizaron cilindros de grafito procedentes de pilas secas recicladas tamaño D, los cuales fueron sometidos a un tratamiento térmico en un mechero al rojo vivo. A continuación, fueron sumergidos en una solución de ácido nítrico (HNO_3 , 5%) durante 20 min mientras se calentaba hasta ebullición, seguidamente, lavados con agua destilada.

Los electrodos fueron perforados en uno de los extremos con una broca “Hss #5/64” haciendo un agujero de 2mm de diámetro en el que se engarzó un alambre de cobre con cubierta

aislante de plástico. Se completó el aislamiento aplicando resina epóxica, cuidando de que el cobre no quede expuesto (figura 5).



Figura 5: Electrodo de grafito tratados.

4.3.4. Preparación del biofilm

La bacteria *Geobacter sp.* utilizada para la construcción de las celdas de combustible microbiano fue obtenida a partir de un trabajo previo (Aislamiento de consorcio bacteriano de la fuente termal de Pucará, perteneciente al cantón Urcuqui-Imbabura para la lixiviación de cobre del proyecto tipo A “Biosensores” (Arcos, 2019).

Para este proceso se utilizó electrodos previamente tratados, descritos en el literal 5.3.4. Para el crecimiento del biofilm primero se debe preparar el medio de cultivo (caldo Lb Lauria Bertani) en un matraz erlenmeyer de 250 ml, luego introducir el electrodo e inocular la bacteria *Geobacter sp.* a concentraciones de 2%, 4% y 6% con respecto al volumen del medio de cultivo (250 ml), posteriormente el matraz se introduce en Shaker Incubator N-Biotek durante 5 días para que las bacterias hagan contacto y anclaje con la superficie (electrodo) es decir se adhieran, para formar microcolonias en las cuales existe comunicación entre las moléculas para producir la matriz extracelular, lo que conlleva al crecimiento y maduración del biofilm (figura 6).



Figura 6: Preparación de biofilm

4.3.5. Construcción de la celda de combustible microbiana

Las celdas de combustible microbiana son de tipo H con puente salino de agar al 2% y cloruro de potasio saturado (figura 7), las condiciones para cada celda son las siguientes:

- **Ánodo:** para la construcción de esta semi-celda se usó un erlenmeyer de boca ancha de capacidad de 250ml, un electrodo de grafito recuperado de las pilas tipo D recicladas, un tapón de caucho que lo cerraba herméticamente, llaves de tres vías hospitalarios y una jeringa de 3ml.
- **Cátodo:** esta semi-celda fue construida con un erlenmeyer de 250ml de capacidad, un electrodo de grafito recuperado de las pilas tipo D recicladas y agua destilada.
- **Puente salino:** el puente salino fue construido con un tubo fusible con una solución de cloruro de potasio 3M y agar al 2%.



Figura 7: Celda de combustible microbiana

4.3.6. Evaluación de las celdas de combustible microbianas

La evaluación de las celdas de combustible microbiana se llevó a cabo mediante la medición del voltaje, intensidad de corriente, densidad de potencia y la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (Bassante,2018).

- **Voltaje**

Se procedió a medir cada 24 horas el voltaje generado por cada CCM a circuito cerrado (es decir con una resistencia que provea la máxima potencia a la celda CCM) y a circuito abierto (sin resistencia) durante 5 días con un multímetro (Digital Multi-Meter E9231) y con un sensor registrador de voltaje NUL-201.

- **Intensidad de Corriente**

Según López (2014), la intensidad de corriente generada por la celda fue calculada mediante la Ley de Ohm.

$$I = V/R$$

I= intensidad de corriente

V= voltaje

R= resistencia externa

- **Densidad de potencia**

Es la cantidad de energía generada por unidad de área del electrodo anódico (mW/m²), también calculada por unidad volumétrica del sustrato (mW/m³)

$$DP = \frac{V^2}{A_{electrodo} * R_{externa}} = \frac{mW}{m^2}$$

DP= densidad de potencia

V² = voltaje al cuadrado

mWm⁻² = miliwats por metro cuadrado

(López, 2014)

- **Eficiencia de remoción de DQO.**

Para calcular la eficiencia de la remoción de la demanda química de oxígeno se utiliza la siguiente ecuación:

$$nDQO = \frac{DQOi - DQOf}{DQOi} * 100$$

n DQO = Eficiencia de remoción DQO en %.

DQOi = Demanda Química de Oxígeno (fracción soluble) inicial, mg/L.

DQOf = Demanda Química de Oxígeno (fracción soluble) final, mg/L.

(López, 2014)

4.3.7. Análisis Estadístico y Diseño experimental

En esta investigación se aplicó un diseño experimental completamente al azar (DCA) con arreglo factorial A x B, el cual consistió en la aplicación de tres concentraciones de inóculo de la bacteria *Geobacter sp.* a dos diferentes cantidades de agua residual con tres repeticiones, con un total de dieciocho unidades experimentales. Se comprobó la normalidad de datos con el test Shapiro-Wilk, y la homogeneidad de varianza, luego se procedió a realizar el análisis

de varianza con el programa Microsoft Excel y R, finalmente se realizó la prueba de Tukey al 5% para identificar diferencias significativas entre tratamientos.

Tabla 2. *Análisis de variables en estudio*

Fuentes de variación	G.L
Total	17
Tratamientos	5
Concentración (C)	2
Sustrato (S)	1
Interacción CxS	2
ERROR EXP	12

En la tabla 3 se detalla las variables dependientes e independientes que se estudian en la investigación. Anguisaca (2015), recomienda utilizar concentraciones de bacterias del género *Geobacter sp.* de 2%, 4% y 6% debido a que son porcentajes que se estudian para las celdas de combustibles microbianas a escala de laboratorio, y cantidad de sustrato (agua residual doméstica) de 250 ml por lo que se toma como referencia estos valores para la realización de esta investigación. La hipótesis de estudio fue la siguiente: se puede utilizar la bacteria *Geobacter sp* en el tratamiento del agua residual del camal de Otavalo y evaluar su acción mediante la disminución de la demanda química de oxígeno y la generación de voltaje.

Tabla 3. *Variables en estudio*

Variable dependiente	Variable independiente
Demanda química de oxígeno	Concentración de la bacteria <i>Geobacter sp.</i> (2%,4%,6%) (volumen/volumen)
Potencial energético producido	Cantidad de combustible (250ml y 500ml)

En la siguiente tabla se describe los tratamientos que se aplicó en esta investigación.

Tabla 4. *Tratamientos aplicados*

Tratamiento 1 (T1)	(2% de bacteria y 250 ml de sustrato)
Tratamiento 2 (T2)	(4% de bacteria y 250 ml de sustrato)
Tratamiento 3 (T3)	(6% de bacteria y 250 ml de sustrato)
Tratamiento 4 (T4)	(2% de bacteria y 500 ml de sustrato)
Tratamiento 5 (T5)	(4% de bacteria y 500 ml de sustrato)
Tratamiento 6 (T6)	(6% de bacteria y 500 ml de sustrato)

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Caracterización del agua residual del Camal de Otavalo

En la Tabla 5, se indica los valores obtenidos en la caracterización y los límites máximos permisibles para la descarga en un cuerpo de agua dulce descrito en el TULSMA libro VI.

Tabla 5. *Caracterización del agua residual del camal de Otavalo*

Parámetro	Unidad	Valor	LMP descarga en cuerpo de agua
Potencial de hidrógeno	pH	8,04	5-9
Conductividad eléctrica	μscm^{-1}	1804	-
Turbidez	NTU	86,1	-
Sólidos Totales	mgL^{-1}	3920	1600
Demanda Biológica de Oxígeno	mgL^{-1}	437	100
Demanda Química de Oxígeno	mgL^{-1}	21169	250

Nota: Límites máximos permisibles para la descarga en un cuerpo de agua dulce recuperado del TULSMA LIBRO VI ANEXO 1.

En la Tabla 5 se puede observar que el parámetro de pH del agua residual del camal de Otavalo se encuentra dentro del rango de los límites máximos permisibles para la descarga en un cuerpo de agua dulce del TULSMA libro VI, los demás parámetros como la demanda química de oxígeno, demanda biológica de oxígeno y sólidos totales no se encuentran dentro de los límites máximos permisibles, la turbidez y la conductividad eléctrica no están descritos

en la tabla de los límites máximos permisibles para la descarga en un cuerpo de agua dulce del TULSMA libro VI.

Según Muñoz (2005), los parámetros iniciales del agua residual de los camales son los siguientes: pH – 8, DQO- 3379,3 mgL⁻¹, DBO – 1770,7 mgL⁻¹, conductividad eléctrica- 650 μ s y sólidos totales – 3066 mgL⁻¹, al comparar con la tabla 5 los valores de los parámetros de DQO, DBO y sólidos totales son inferiores en esta investigación, el valor de pH es el mismo. En la investigación de Benavides (2006) los parámetros medidos tuvieron los siguientes resultados: pH – 7,11, DQO- 1600 mgL⁻¹, DBO – 1000 mgL⁻¹.

5.2.Evaluación de las celdas de combustible microbianas

Para evaluar las celdas de combustibles microbianas se tomaron en cuenta parámetros como el voltaje, intensidad de corriente, densidad de potencia, demanda química de oxígeno y pH, a continuación, se muestra los resultados de la evaluación de los distintos tratamientos aplicados en las celdas de combustibles microbianas y de los parámetros que se evaluaron en las mismas:

5.2.1. Voltaje

La medición del voltaje se la realizó cada veinticuatro horas durante cinco días, tomando como referencia la investigación de Buitrón y Pérez (2011), a continuación, se muestran los resultados obtenidos:

- **Tratamiento 1 (2% de inóculo de bacteria y 250 ml de sustrato) (T1)**

Tabla 6. *Resultados de voltaje del tratamiento 1*

Tratamiento 1 (Voltaje)(v)				
Tiempo(h)	R1	R2	R3	Promedio
24	0,22	0,14	0,32	0,23
48	0,32	0,2	0,4	0,31
72	0,41	0,25	0,51	0,39
96	0,42	0,25	0,5	0,39
120	0,56	0,46	0,67	0,56
Promedio	0,39	0,26	0,48	

En la figura 8 se puede observar que el voltaje en el tratamiento 1 inicio con 0,23 voltios y al transcurrir el tiempo fue aumentando, entre las 72 y 96 horas el voltaje se mantuvo constante y al finalizar el tratamiento tuvo un aumento de 0,17 voltios, es decir que llego hasta 0,56 voltios a las 120 horas. En promedio los datos se desvían 0,11 con respecto a la media 0,38, su límite máximo es 0,49 y su límite mínimo es 0,27.

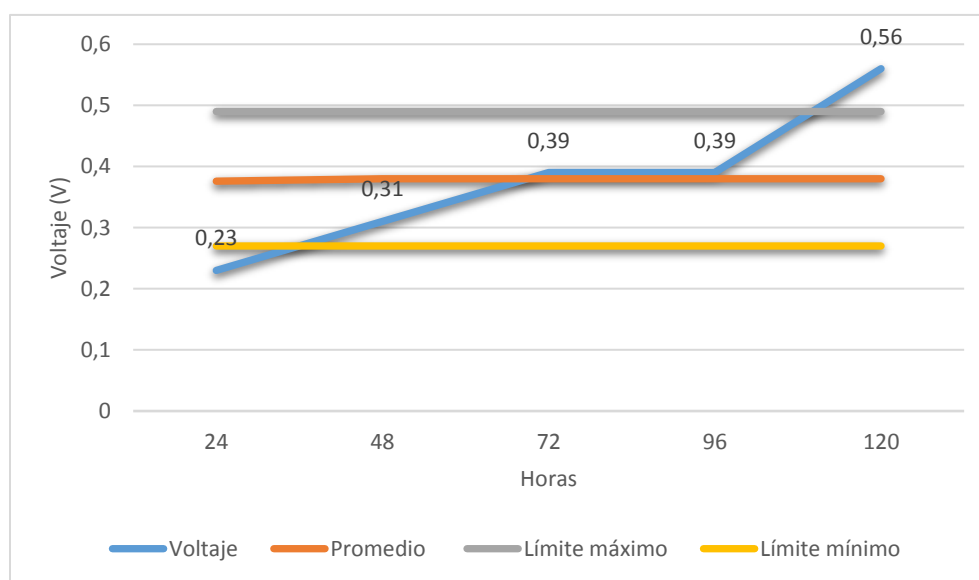


Figura 8: Medición promedio de voltaje del tratamiento 1

- **Tratamiento 2 (4% de inóculo de bacteria y 250 ml de sustrato) (T2)**

Tabla 7. Resultados de voltaje del tratamiento 2

Tratamiento 2 (Voltaje)(v)				
Tiempo(h)	R1	R2	R3	Promedio
24	0,33	0,3	0,37	0,33
48	0,41	0,33	0,52	0,42
72	0,45	0,43	0,52	0,47
96	0,49	0,44	0,53	0,49
120	0,52	0,44	0,56	0,51
Promedio	0,44	0,39	0,5	

El tratamiento 2 obtuvo resultados de voltaje en constante aumento cada día como se puede observar en la figura 9. El máximo valor fue de 0,51 voltios al finalizar el tratamiento. En promedio los datos se desvían 0,06 con respecto a la media 0,44, su límite máximo es 0,51 y su límite mínimo es 0,38.

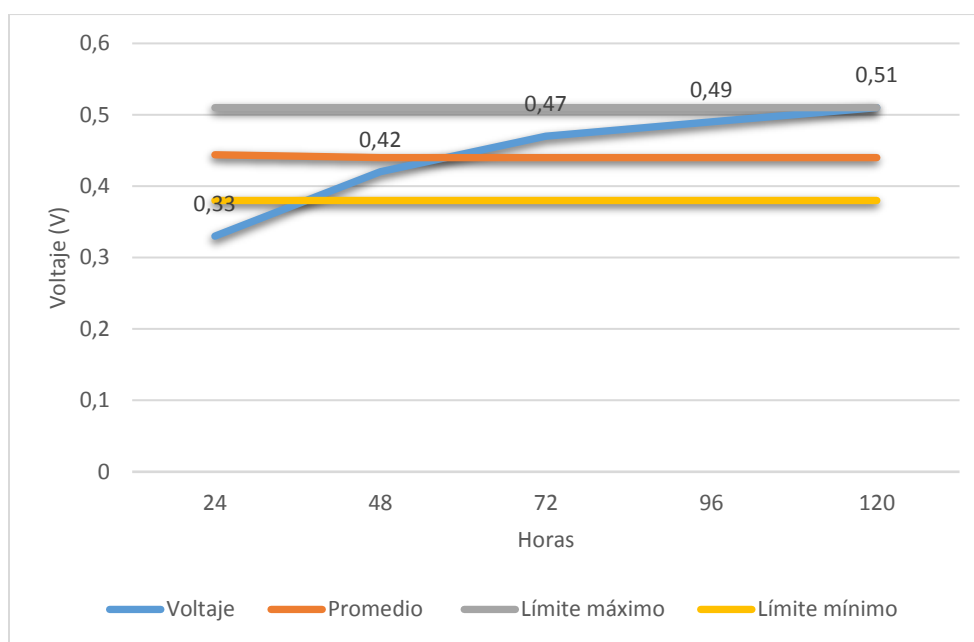


Figura 9: Medición promedio de voltaje del tratamiento 2

- **Tratamiento 3 (6% de inóculo de bacteria y 250 ml de sustrato) (T3)**

Tabla 8. Resultados de voltaje del tratamiento 3

Tratamiento 3 (Voltaje)(v)				
Tiempo(h)	R1	R2	R3	Promedio
24	0,22	0,12	0,2	0,18
48	0,35	0,25	0,29	0,30
72	0,42	0,34	0,36	0,37
96	0,48	0,36	0,33	0,39
120	0,55	0,38	0,46	0,46
Promedio	0,40	0,29	0,33	

La figura 10 indica que el voltaje en el tratamiento 3 fue aumentando al transcurrir el tiempo del experimento, se observa que entre las 72 y 96 horas no hay diferencia significativa en el aumento del voltaje, al igual que en el tratamiento 2. En promedio los datos se desvían 0,09 con respecto a la media 0,43, su límite máximo es 0,25 y su límite mínimo es 0,38.

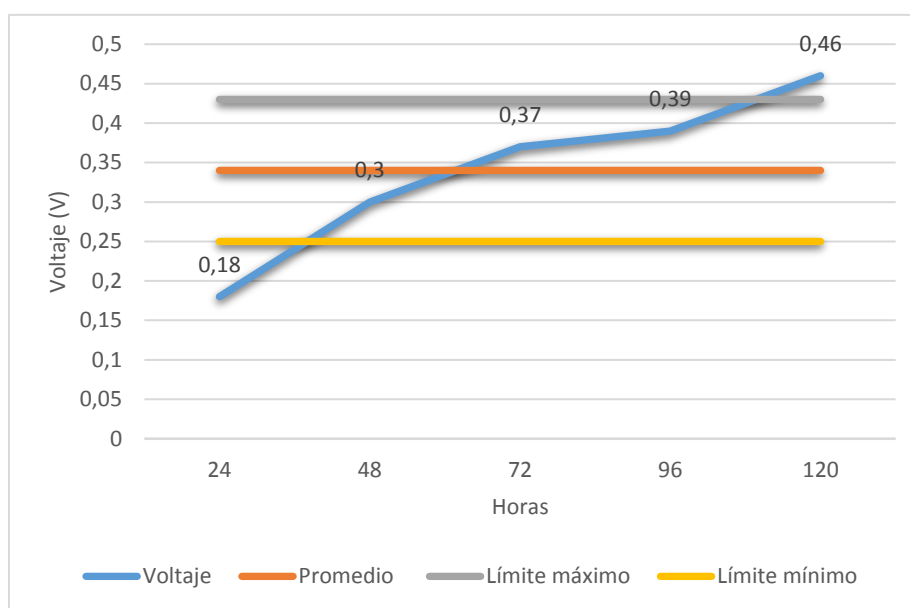


Figura 10: Medición promedio de voltaje del tratamiento 3

- **Tratamiento 4 (2% de inóculo de bacteria y 500 ml de sustrato) (T4)**

Tabla 9. Resultados de voltaje del tratamiento 4

Tratamiento 4 (Voltaje)(v)				
Tiempo(h)	R1	R2	R3	Promedio
24	0,38	0,33	0,17	0,29
48	0,48	0,4	0,05	0,31
72	0,49	0,45	0,42	0,45
96	0,45	0,5	0,47	0,47
120	0,47	0,56	0,3	0,44
Promedio	0,45	0,45	0,28	

El tratamiento 4 inicio con una medición de voltaje de 0,29 voltios, el cual fue aumentando hasta las 96 horas, después se puede observar que disminuye al llegar a las 120 horas, como se muestra en la figura 11. En promedio los datos se desvían 0,08 con respecto a la media 0,47, su límite máximo es 0,32 y su límite mínimo es 0,38.

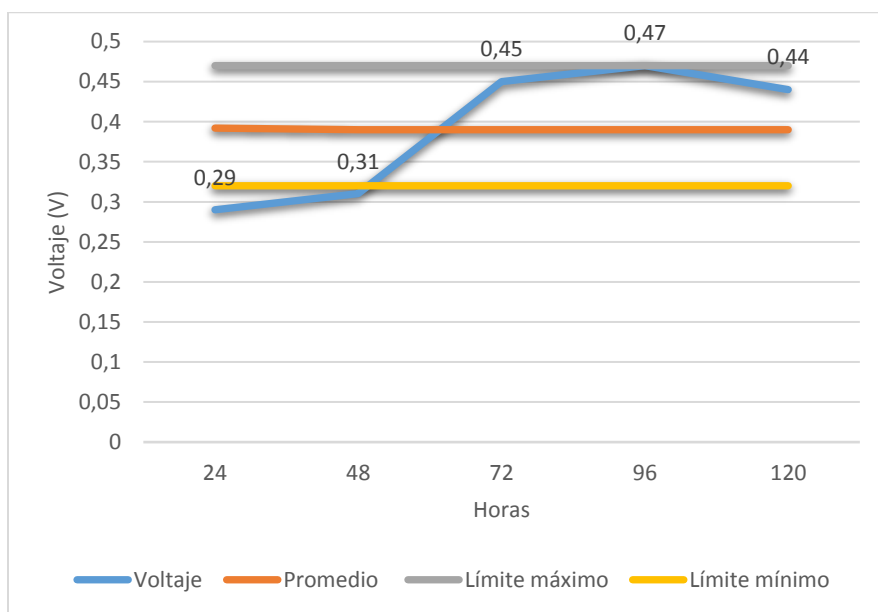


Figura 11: Medición promedio de voltaje del tratamiento 4

- **Tratamiento 5 (4% de inóculo de bacteria y 500 ml de sustrato) (T5)**

Tabla 10. Resultados de voltaje del tratamiento 5

Tratamiento 5 (Voltaje)(v)				
Tiempo(h)	R1	R2	R3	Promedio
24	0,44	0,29	0,26	0,33
48	0,47	0,37	0,3	0,38
72	0,49	0,41	0,22	0,37
96	0,48	0,38	0,25	0,37
120	0,64	0,6	0,4	0,55
Promedio	0,50	0,41	0,29	

La figura 12 nos muestra que el tratamiento 5 a las 48 horas tuvo un voltaje de 0,38 voltios, a las 72 horas disminuyó y se mantuvo constante hasta las 96 horas, al finalizar el tratamiento, es decir a las 120 horas se puede observar que el voltaje aumentó hasta 0,55 voltios. En promedio los datos se desvían 0,08 con respecto a la media 0,48, su límite máximo es 0,32 y su límite mínimo es 0,38.

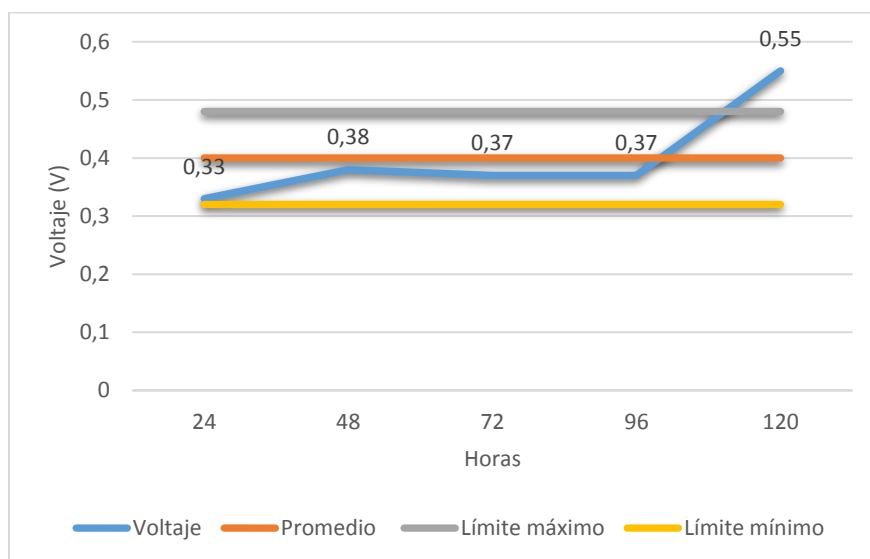


Figura 12: Medición promedio de voltaje del tratamiento 5

- **Tratamiento 6 (6% de inóculo de bacteria y 500 ml de sustrato) (T6)**

Tabla 11. Resultados de voltaje del tratamiento 6

Tratamiento 6 (Voltaje)(v)				
Tiempo(h)	R1	R2	R3	Promedio
24	0,45	0,3	0,32	0,36
48	0,53	0,33	0,21	0,36
72	0,51	0,33	0,23	0,36
96	0,51	0,37	0,36	0,41
120	0,46	0,53	0,24	0,41
Promedio	0,49	0,37	0,27	

El voltaje en el tratamiento 6 fue constante las 72 horas de funcionamiento de las celdas de combustibles microbianas, posteriormente aumento y siguió constante hasta finalizar el tratamiento, como se indica en la figura 13. En promedio los datos se desvían 0,02 con respecto a la media 0,48, su límite máximo es 0,40 y su límite mínimo es 0,36.

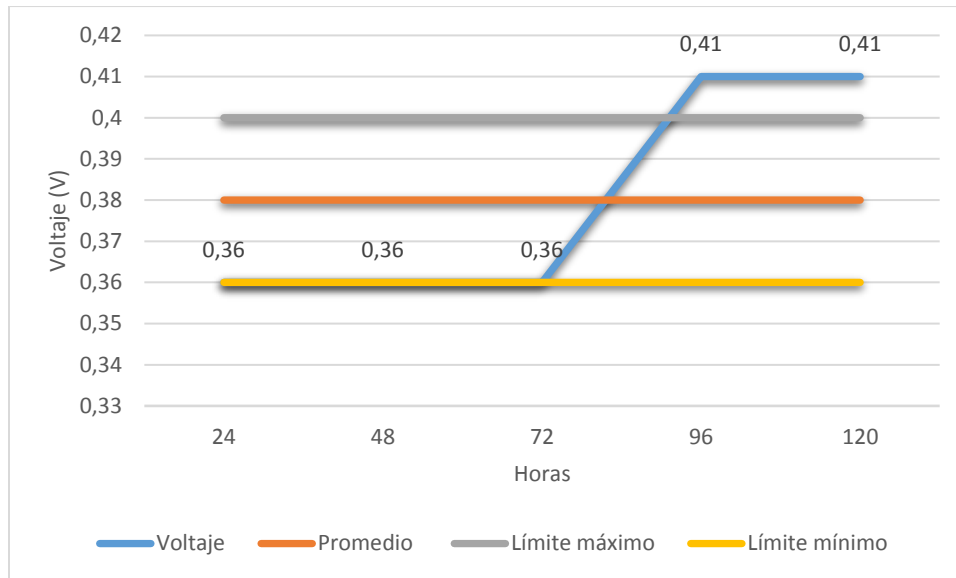


Figura 13: Medición promedio de voltaje del tratamiento 6

La figura 14 nos indica la medición promedio del voltaje de todos los tratamientos, el tratamiento 1 tuvo el valor máximo de voltaje (0,56 V) a las 120 horas, seguido del tratamiento 5(0,55V), 2(0,51V), 3(0,46V), 4(0,44V) y 6(0,41V), esto puede ser debido a que según Buitrón y Pérez (2011), el aumento del voltaje se debe al crecimiento microbiano, es decir que las bacterias que se encuentran en las celdas de combustible microbianas se reprodujeron contribuyendo así a la generación de electricidad y a la vez están produciendo gran cantidad de electrones al metabolizar la materia orgánica presente en el agua residual.

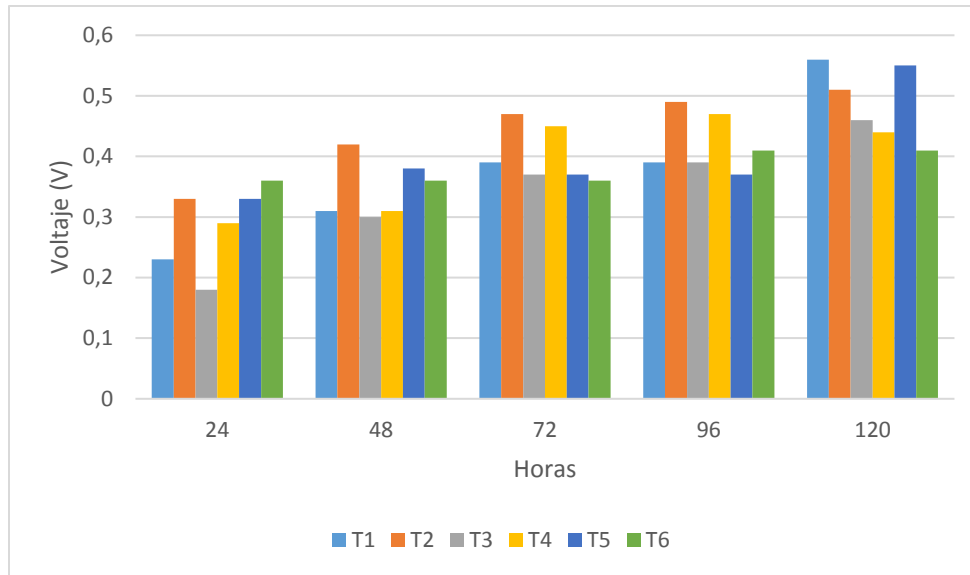


Figura 14: Medición promedio de voltaje de todos los tratamientos.

Nota: T1(2% de bacteria y 250 ml de sustrato), T2(4% de bacteria y 250 ml de sustrato), T3 (6% de bacteria y 250 ml de sustrato), T4 (2% de bacteria y 500 ml de sustrato), T5 (4% de bacteria y 500 ml de sustrato), T6 (6% de bacteria y 500 ml de sustrato).

En la figura 14 se puede apreciar que el tratamiento 4 tuvo una disminución de voltaje a las 120 horas esto producido por la muerte progresiva de las bacterias debido a las condiciones al que se exponen, al morir disminuye la cantidad de electrones producidos y por lo tanto disminuye la diferencia de potencial.

Esto podría ser debido que al comienzo los microorganismos disponían de una concentración de sustrato elevada y suficiente para llevar a cabo sus funciones vitales y producir energía. Sin embargo, con el tiempo la concentración de sustrato disminuyó ya que los microorganismos la consumieron y, pasado un tiempo, la concentración de sustrato en el medio no era suficiente para producir electricidad y por lo tanto el voltaje disminuyó (González, 2015).

Las pérdidas de voltaje debidas al metabolismo bacteriano son inevitables ya que estas pérdidas son consecuencia de que las bacterias deriven energía de la oxidación del sustrato. En principio, las bacterias necesitan energía suficiente solo para transportar un protón a través de una membrana, o para hacer 1 ATP a través de un método de fosforilación del sustrato (Logan, 2008).

Otro factor que normalmente incide sobre la generación de energía es la concentración del sustrato, esta dependencia es característica de las reacciones enzimáticas que ocurren en la CCM. Un incremento en la concentración del sustrato acelera la velocidad de reacción, lo que normalmente conduce a una mayor generación de energía, sin embargo, algunos autores han encontrado efectos contrarios y altas densidades de potencia a bajas concentraciones, como sucedió en este experimento, en la figura 14 se puede observar que los valores más altos de voltajes se obtuvieron en el tratamiento 1, 2 y 3 los cuales contenían un sustrato de cantidad inferior a los tratamientos 4, 5 y 6.

Hay dos posibles razones que explican este comportamiento, primero, un incremento de los productos de fermentación que ocasionan una disminución del pH en el sistema, lo cual inhibe la actividad enzimática; segundo, algunos compuestos del sustrato orgánico son utilizados para el crecimiento bacteriano y no para la generación de electricidad (Sharma y Li, 2010).

En el estudio realizado por Humberto et al. (2017), las celdas tuvieron un incremento de voltaje en los primeros dos días (los valores más altos oscilan entre 0,40 y 0,47 V) que se mantuvo durante los primeros cuatro a cinco días y después disminuyó paulatinamente, probablemente debido al consumo de una buena parte de los donadores de electrones contenidos en el medio.

En la investigación realizada por Ñacato (2018), se puede apreciar que a diferencia del sustrato puro (agua sintética), los voltajes generados con el agua residual fueron más bajos, siendo el valor más alto 0,39 V (rango alto), esto es porque el agua residual, al ser proveniente de diversos hogares, es un sustrato complejo, ya que contiene una diversidad de contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos, sólidos suspendidos, sedimentables, coloides, etc.; por tal motivo es más difícil el transporte de electrones, debido a esto las aguas sintéticas generan mejores voltajes.

Debido a que las aguas sintéticas contienen gran cantidad de iones, los cuales ayudan a la movilidad de cargas por ende es más fácil y efectiva la producción de energía, además el sustrato a degradar (acetato) es muy simple y no existe competencia de especies captadoras de electrones que disminuyen la eficiencia en el paso de electrones. Cabe recalcar que las

bacterias solo pueden crecer dentro de ciertos límites de salinidad, y por lo tanto la conductividad de la solución no se puede aumentar más allá de ciertos rangos (Oh y Logan, 2006).

En el análisis realizado por Buitrón y Pérez (2011), se generó voltaje máximo de 0,54, 0,53 y 0,76 V con una duración de 24, 24 y 142 horas para las celdas de 40, 80 y 120 ml, respectivamente. Es decir, al utilizar la celda de 120 ml, el voltaje obtenido fue mayor, así como el tiempo durante el cual fue mantenido.

El voltaje generado durante la experimentación se debe a que las bacterias generan electrones durante su metabolismo y que estos son transferidos al ánodo que se encuentran en condiciones anaeróbicas conectado a un cátodo en condiciones aeróbicas a través de un material conductor que contiene una resistencia mediante el cual fluye los electrones dando así una diferencia de potencial. La transferencia directa de los electrones producidos sin la necesidad de mediadores redox se debe a que estas bacterias son de carácter electrogénico (Anguisaca, 2015).

- **Análisis estadístico**

En la tabla 12 se observa que los datos del parámetro de voltaje provienen de una distribución normal ya que aplicando el shapiro test se obtiene el resultado de que p value es mayor que el límite de significancia 0,05. También se indica que si existe homogeneidad entre las varianzas ya que p value es mayor al límite de significancia 0,05.

Tabla 12. *Normalidad de datos y homogeneidad de varianza*

Shapiro test	Bartlett test
P Value = 0,1355	P Value = 0,9172

La tabla 13, indica el análisis de varianza del parámetro de voltaje, se evidencia que no existen diferencias significativas (ns) entre la medición del voltaje de los 6 tratamientos por lo que no es necesario realizar la prueba tukey al 5%. Se obtuvo un coeficiente de variación (CV) de 25, 64% lo que determina que existe una dispersión considerable de los datos con respecto al promedio.

Tabla 13. *Análisis de varianza para el parámetro de voltaje*

FV	GL	SC	CM	Fo	F0.05	F0.01	Significancia
Total	17	0,12	0,01				
Tratamiento	5	0,02	0,00	0,41	3,11	5,06	ns
Sustrato	1	0,00	0,00	0,01	4,75	9,33	ns
Concentración	2	0,01	0,01	0,71	3,89	6,93	ns
I CxS	2	0,01	0,00	0,30	3,89	6,93	ns
Error	12	0,0	0,01				

CV= 25,64%

\bar{X} = 0,39

5.2.2. Intensidad de Corriente (mA)

El parámetro de intensidad de corriente se lo midió con la ayuda de un multímetro, el cual estaba conectado a una resistencia de 120 ohmios, se eligió este valor de resistencia externa bajo para prevenir las pérdidas de activación y facilitar la transferencia de electrones. A continuación, se indica los resultados obtenidos.

Tabla 14. *Medición de Intensidad de Corriente de todos los tratamientos*

	Intensidad de Corriente (mA)				
	24h	48h	72h	96h	120h
T1	0,0004	0,0003	0,0004	0	0,0004
T2	0,001	0,0025	0,0003	0,0004	0,0007
T3	0,0003	0,0005	0,0007	0,0005	0,0008
T4	0,0006	0,0007	0,0007	0,0004	0,0015
T5	0,0008	0,001	0,0009	0,0007	0,0022
T6	0,001	0,0011	0,0015	0,0011	0,0009

En la figura 15 se indica la medición de la intensidad de corriente, en la cual se puede observar que el tratamiento 2 tuvo el máximo valor (0,0025 mA) a las 48 horas, pero disminuye al transcurrir el tiempo, se evidencia que el tratamiento 6 (0,0015mA) obtuvo el máximo valor a las 72 horas y al igual que el tratamiento 2 después va disminuyendo hasta

finalizar el experimento, los demás tratamientos a partir de las 96 horas aumentan hasta las 120 horas.

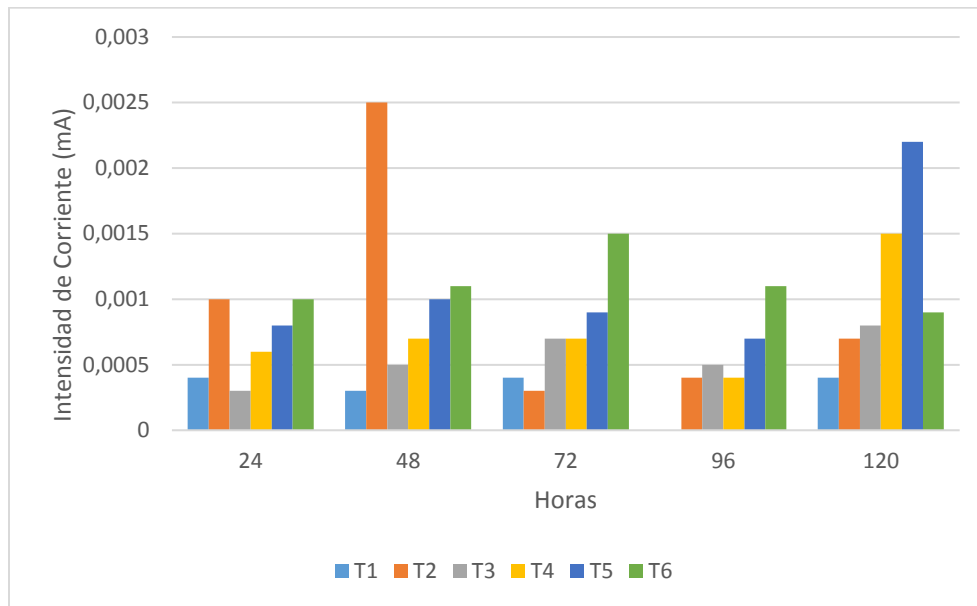


Figura 15: Medición promedio de intensidad de corriente (mA) de todos los tratamientos.

Nota: T1(2% de bacteria y 250 ml de sustrato), T2(4% de bacteria y 250 ml de sustrato), T3 (6% de bacteria y 250 ml de sustrato), T4 (2% de bacteria y 500 ml de sustrato), T5 (4% de bacteria y 500 ml de sustrato), T6 (6% de bacteria y 500 ml de sustrato).

En la investigación de Bassante (2018), la intensidad de corriente más alta fue de 0,0019 mA a las 96 horas de funcionamiento de las celdas de combustible microbianas, al igual que los tratamientos aplicados en este experimento como se puede observar en la figura 15.

La transferencia de protones es observada mediante el aumento de la corriente a lo largo del experimento, lo cual estaría posiblemente relacionado en cierta manera con el aumento del pH del medio, al ser utilizados los protones para la generación de corriente (Chang et al., 2005). En el estudio de Carmona (2008), el pH varió de un valor de 7,67 a 8,71 después de 10h de operación. Después de la tercera hora del ensayo, se observó que la corriente fue en ascenso, hasta llegar a un valor máximo de $3,8 \times 10^{-7}$ A, lo cual se logró en un total de 10 h de operación.

- **Análisis estadístico**

En la tabla 15 se observa que los datos del parámetro de intensidad de corriente provienen de una distribución normal ya que aplicando el shapiro test se obtiene el resultado de que p value es mayor que el límite de significancia 0,05. También se indica que si existe homogeneidad entre las varianzas ya que p value es mayor al límite de significancia 0,05.

Tabla 15. *Normalidad de datos y homogeneidad de varianza*

Shapiro test	Bartlett test
P Value = 0,7413	P Value = 0,6458

La tabla 16, indica el análisis de varianza del parámetro de intensidad de corriente, se evidencia que no existen diferencias significativas (ns) entre la medición de la intensidad de corriente de los 6 tratamientos por lo que no es necesario realizar la prueba tukey al 5%. Se obtuvo un coeficiente de variación (CV) de 13,6% lo que determina que existe una dispersión considerable de los datos con respecto al promedio.

Tabla 16. *Análisis de varianza para el parámetro de intensidad de corriente*

FV	GL	SC	CM	Fo	F0.05	F0.01	Significancia
Total	17	0,000016	0,0000009				
Tratamiento	5	0,000002	0,0000003	0,26	3,11	5,06	ns
Sustrato	1	0,0000003	0,0000003	0,27	4,75	9,33	ns
Concentración	2	0,0000008	0,0000004	0,35	3,89	6,93	ns
I CxS	2	0,0000004	0,0000002	0,16	3,89	6,93	ns
Error	12	0,000014	0,0000012				

CV=13,6%

\bar{X} = 0,0008

5.2.3. Densidad de Potencia

La densidad de potencia fue calculada mediante la siguiente formula $V^2/\text{Área}$ del electrodo

* Resistencia externa aplicada. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 17. *Medición de Densidad de Potencia de todos los tratamientos*

Densidad de Potencia (mWm⁻²)					
	24h	48h	72h	96h	120h
T1	0,0157	0,007	0,0118	0,0001	0,0118
T2	0,0853	0,5639	0,007	0,0136	0,0435
T3	0,01	0,0251	0,0435	0,0251	0,0585
T4	0,0337	0,0401	0,0401	0,0136	0,1956
T5	0,0627	0,0902	0,0669	0,0471	0,4456
T6	0,0853	0,1005	0,2106	0,1059	0,0069

La figura 16 nos indica la medición de densidad de potencia de todos los tratamientos, en la cual se puede observar que el tratamiento 2 tuvo el máximo valor (0,5639 mWm⁻²) a las 48 horas, pero disminuye al transcurrir el tiempo, se evidencia que el tratamiento 6 (0,2106 mWm⁻²) obtuvo el máximo valor a las 72 horas y al igual que el tratamiento 2 después va disminuyendo hasta finalizar el experimento, los demás tratamientos a partir de las 96 horas aumentan hasta las 120 horas.

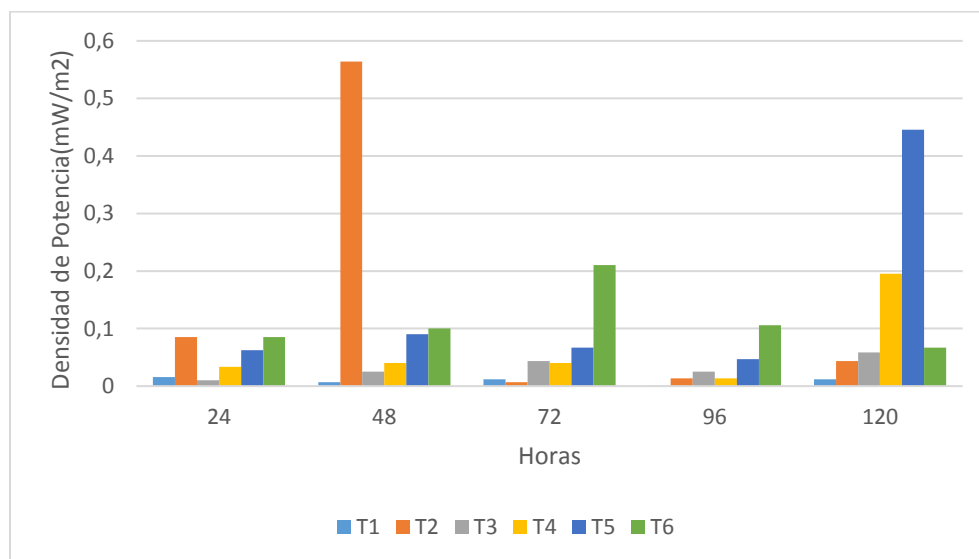


Figura 16: Medición promedio de densidad de potencia (mW/m²) de todos los tratamientos.

Nota: T1(2% de bacteria y 250 ml de sustrato), T2(4% de bacteria y 250 ml de sustrato), T3 (6% de bacteria y 250 ml de sustrato), T4 (2% de bacteria y 500 ml de sustrato), T5 (4% de bacteria y 500 ml de sustrato), T6 (6% de bacteria y 500 ml de sustrato).

En el estudio realizado por Buitrón y Pérez (2011), la densidad de potencia máxima fue de 14 mWm^{-2} , alta si se compara con las reportadas en este experimento, esto debido a que no se emplearon mediadores externos y a que el donador de electrones es agua residual convencional. En dicho estudio la mayor densidad de potencia se obtuvo con la celda de 120 ml. No se encontró una diferencia significativa entre las celdas de 40 y 80 mL. Lo anterior indica que el volumen de la celda no tiene una influencia sobre la densidad de potencia obtenida. Liu y Logan (2004), utilizaron una celda de 180 mL con y sin membrana de intercambio de protones. La densidad de potencia obtenida fue de 262 ± 10 y $494 \pm 21 \text{ mW/m}^2$ con y sin membrana, respectivamente. En la investigación de Mora y Bravo (2017), se reportó valores de potencia máximos de $4,85 \text{ mWm}^{-2}$.

- **Análisis estadístico**

En la tabla 18 se observa que los datos del parámetro de densidad de potencia provienen de una distribución normal ya que aplicando el shapiro test se obtiene el resultado de que p value es mayor que el límite de significancia 0,05. También se indica que si existe homogeneidad entre las varianzas ya que p value es mayor al límite de significancia 0,05.

Tabla 18. *Normalidad de datos y homogeneidad de varianza*

Shapiro test	Bartlett test
P Value = 0,3922	P Value = 0,1777

La tabla 19, indica el análisis de varianza del parámetro de densidad de potencia, se evidencia que no existen diferencias significativas (ns) entre la medición de densidad de potencia de los 6 tratamientos por lo que no es necesario realizar la prueba tukey al 5%. Se obtuvo un coeficiente de variación (CV) de 17, 5% lo que determina que existe una dispersión considerable de los datos con respecto al promedio.

Tabla 19. *Análisis de varianza para el parámetro de densidad de potencia*

FV	GL	SC	CM	Fo	F0.05	F0.01	Significancia
Total	17	0,657	0,039				
Tratamiento	5	0,029	0,006	0,11	3,11	5,06	ns
Sustrato	1	0,004	0,004	0,07	4,75	9,33	ns
Concentración	2	0,054	0,027	0,52	3,89	6,93	ns
I CxS	2	0,025	0,013	0,24	3,89	6,93	ns
Error	12	0,628	0,052				

CV=17,5%

\bar{X} = 0,13

5.2.4 Demanda Química de Oxígeno

La demanda química de oxígeno es un parámetro importante en la evaluación de las celdas de combustibles microbianas ya que permite observar la evolución del contenido de materia orgánica e inorgánica en el sustrato, y permite analizar la oxidación del mismo a través de un tiempo determinado. A continuación, se indican los resultados obtenidos en esta investigación.

Tabla 20. *Medición de la demanda química de oxígeno*

	Demanda Química de Oxígeno (mgL⁻¹)			
	R1	R2	R3	Promedio
T1	19843	20229	19535	19869
T2	18384	15447	18744	17525
T3	13183	14934	20185	16101
T4	12305	6341	13797	10814
T5	13278	16220	7832	12443
T6	16716	16856	13431	15668

- **Análisis estadístico**

En la tabla 21 se observa que los datos del parámetro de la demanda química de oxígeno provienen de una distribución normal ya que aplicando el shapiro test se obtiene el resultado de que p value es mayor que el límite de significancia 0,05. También se indica que si existe homogeneidad entre las varianzas ya que p value es mayor al límite de significancia 0,05.

Tabla 21. *Normalidad de datos y homogeneidad de varianza*

Shapiro test	Bartlett test
P Value = 0,5122	P Value = 0,1643

La tabla 22, indica el análisis de varianza del parámetro de la demanda química de oxígeno, se evidencia que no existen diferencias significativas (ns) para los factores de sustrato, interacción de la concentración del inóculo de la bacteria y el sustrato y para los tratamientos, pero para el factor de la concentración existe diferencias significativas (*). Se obtuvo un coeficiente de variación (CV) de 19,49% lo que determina que existe una dispersión considerable de los datos con respecto al promedio.

Tabla 22. *Análisis de varianza para el parámetro de DQO*

FV	GL	SC	CM	Fo	F0.05	F0.01	Significancia
Total	17	272667562.00	16039268.35				
Tratamiento	5	164460945.33	32892189.07	3,65	3,11	5,06	ns
Sustrato	1	9706418.00	9706418.00	1,08	4,75	9,33	ns
Concentración	2	98706973.00	49353486.50	5,47	3,89	6,93	*
I CxS	2	56047554.33	28023777.17	3,11	3,89	6,93	ns
Error	12	108206616.67	9017218.06				

CV=19.49%.

\bar{X} = 15403,33

5.2.5. Eficiencia de remoción de DQO

Para calcular la eficiencia de la remoción de DQO se aplicó la siguiente fórmula: $(DQO_i - DQO_f / DQO_i) * 100$. En este caso la demanda química de oxígeno inicial es de 21169 mg.l^{-1} . A continuación, se muestran los resultados:

Tabla 23. Porcentaje de remoción de DQO

Tratamientos	Porcentaje(%)remoción
T1	6.14
T2	23.95
T3	41.22
T4	17.21
T5	48.92
T6	25.99

La figura 17 indica el porcentaje de remoción de la demanda química de oxígeno, en la cual se puede observar que el tratamiento 5 (48,92%) tuvo la mejor eficiencia de remoción de DQO.

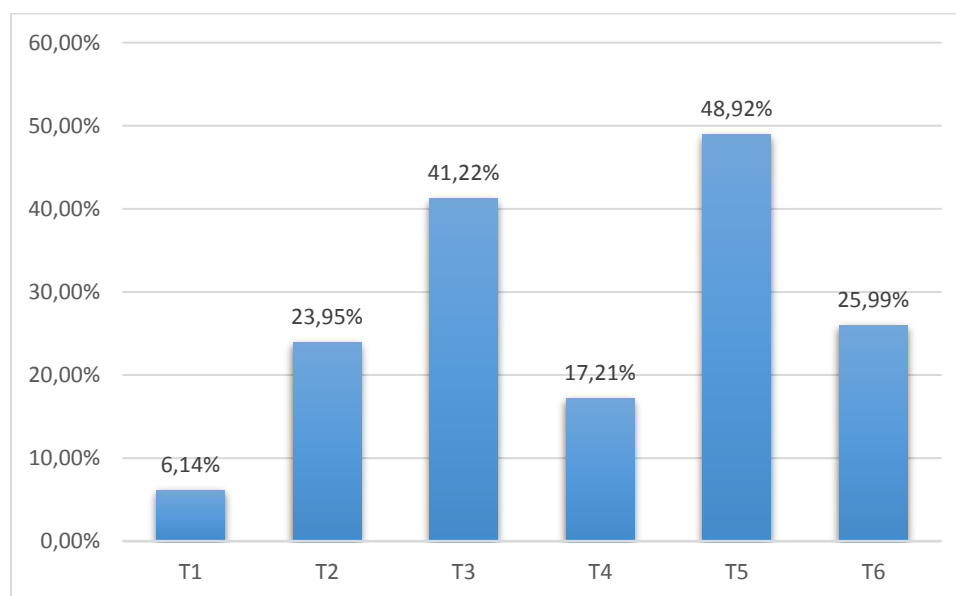


Figura 17: Medición promedio de Porcentaje de Remoción de DQO.

Nota: T1(2% de bacteria y 250 ml de sustrato), T2(4% de bacteria y 250 ml de sustrato), T3 (6% de bacteria y 250 ml de sustrato), T4 (2% de bacteria y 500 ml de sustrato), T5 (4% de bacteria y 500 ml de sustrato), T6 (6% de bacteria y 500 ml de sustrato).

En la investigación de Zuo, Maness y Logan (2006), reportaron una remoción de materia orgánica de alrededor del 70% en una CCM que trata residuos agroindustriales. Rea (2017), al usar concentración de DQO alto llega a un máximo de 77,86% de remoción, al comparar los resultados con estos estudios la remoción de este experimento es mucho más baja.

5.2.6. pH

El pH se mantuvo entre 7 y 8 durante todo el experimento y se trabajó a temperatura de 22°C. El pH fue utilizado para el control del sistema.

Otro parámetro importante en el desempeño de la MFC es el pH del compartimiento anódico. La densidad de potencia disminuye ligeramente a medida que el pH aumenta. Para valores mayores de 7 el sistema se estabiliza teniendo un valor constante. Y un pH más cercano a neutro (6 a 7) se considera que estabiliza las condiciones de la celda y mejora el voltaje a lo largo del tiempo. Por lo que podemos inferir que la cantidad de sustrato concentrado en la cámara anódica podría ser proporcional a la cantidad de voltaje producido y que en los días que el metabolismo microbiano era mayor podría haber generado mayor voltaje (Pistonesi et al., 2010).

La eficiencia de la CCM igualmente está afectada por sus condiciones de operación, entre ellas el pH electrolítico. Los gradientes de pH se producen por la acidificación en la cámara anódica y la alcalinización en la cámara catódica, esto se presenta debido a que en las reacciones anódicas se producen protones y en las reacciones del cátodo se consumen protones. Cuando en la cámara anódica la difusión y la migración de los protones a través de la MIP es lenta, se produce una disminución del pH ocasionando una disminución drástica de la actividad bacteriana y por consiguiente se afecta la transferencia de protones hacia la cámara catódica (Huang et al., 2011).

5.2.7. Conductividad eléctrica

Para el parámetro de la conductividad eléctrica se registró valores entre 1720 y 1597 μs para todos los tratamientos aplicados. Esta medida indica la facilidad con la que la corriente eléctrica pasa a través del agua residual. Puesto que el agua pura es muy mala conductora de la corriente eléctrica, las conductividades elevadas indican la presencia de impurezas, y más

concretamente de sales disueltas. Como resultado del uso doméstico del agua la conductividad aumenta, y se sitúa normalmente en el intervalo 1000-2000 μ s (Logan, 2009).

5.2.8. Turbidez

La turbidez tuvo resultados entre 68,3 y 60,3 NTU. La medición de la turbidez está ligada a la de la cantidad de materia sólida presente en el agua. Es un valor utilizado como indicador de la calidad del agua y también se le denomina sólidos en suspensión (Cervantes, 2011).

5.2.9. Sólidos Totales

La medida de los sólidos totales en promedio fue de entre 3025 y 2605 mg/l. En el estudio realizado por Liu y Logan (2010), se obtuvieron valores de 2717 y 2108 mg/l. Los sólidos orgánicos pueden ser utilizados como alimento por las bacterias, que de esta forma los estabilizan durante el proceso de depuración. Por consiguiente. La medida de los sólidos orgánicos da una idea de la tratabilidad biológica del agua. Los análisis de sólidos son importantes en el control de procesos de tratamiento biológico y físico de aguas residuales y para evaluar el cumplimiento de las limitaciones que regulan su vertimiento.

5.2.10. Demanda biológica de oxígeno

Para el parámetro de la demanda biológica de oxígeno se registró valores entre 275 y 190 mg.l⁻¹. Cheng (2006), obtuvo valores promedio de 126 y 85 mg.l⁻¹. Liu, Grot y Logan, (2005), registro mediciones de 188 y 176 mg.l⁻¹ en su investigación. Dentro de la materia orgánica se puede distinguir entre distintos tipos de compuestos, más o menos complejos, y cuya degradación biológica requiere un tiempo más o menos largo.

5.3. Socialización de la investigación

La investigación fue socializada en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra en la escuela de Ciencias Agrícolas y Ambientales que se realizó el 17 de octubre de 2019 desde las 9:00 am hasta las 10: 00 am en el edificio 4 aula 4-3-13, en donde se contó con la participación de estudiantes del séptimo nivel de la carrera de Ciencias Ambientales y Ecodesarrollo. En la ponencia se presentó la investigación realizada, la problemática de las plantas de tratamientos que poseen los camales de Ecuador, el uso de microorganismos electrogénicos, la aplicación de las celdas de combustible microbiológicas como alternativa

para el tratamiento del agua residual de canales, seguido de los objetivos propuestos, metodología aplicada, resultados obtenidos, conclusiones y recomendaciones.

Los resultados de la socialización se evidencian en la tabulación de las encuestas realizadas a los asistentes, en donde se puede observar que en la organización del evento los encuestados respondieron que la sala en donde se desarrolló el evento y el material audiovisual fue adecuada ya que se obtuvo la calificación de muy alto para los dos ítems (figura 19). En el aspecto de la ejecución del evento por parte del expositor para las preguntas del dominio del tema, manejo del auditorio y facilidad de expresión se tuvieron resultados como muy alto (figura 20). En la medición de impacto de la investigación los resultados fueron de alto para las preguntas como: el tema investigado posee relevancia para algún actor o sector de la sociedad, la investigación posee perspectivas para estudios complementarios posteriores, el tema genera beneficios y si se cumplieron los objetivos (figura 21).

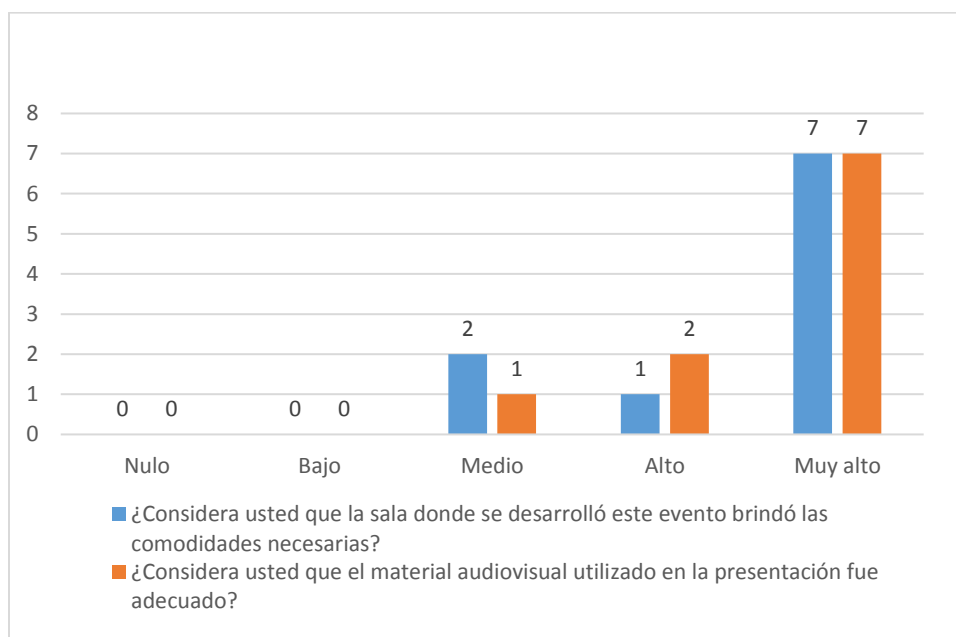


Figura 18: Resultados de la organización del evento de socialización

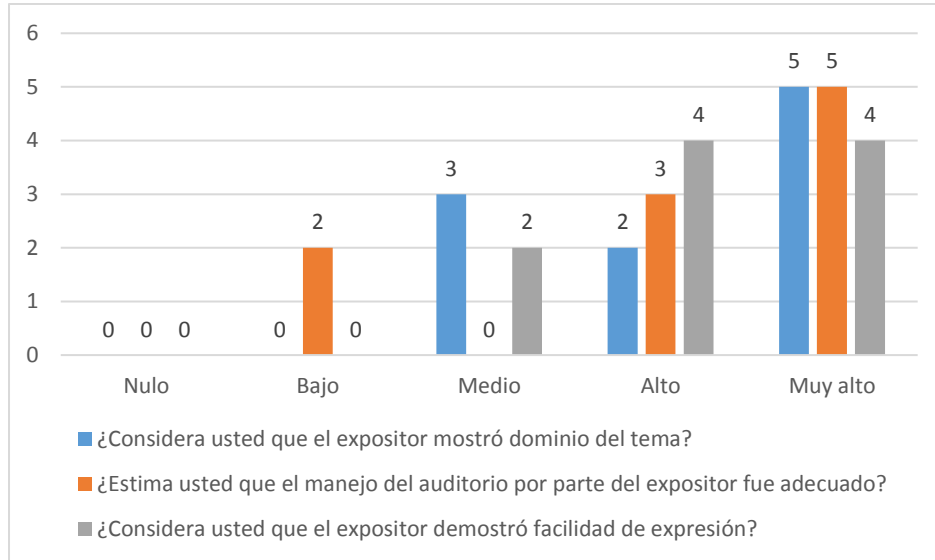


Figura 19: Resultados de la ejecución del evento por parte del expositor

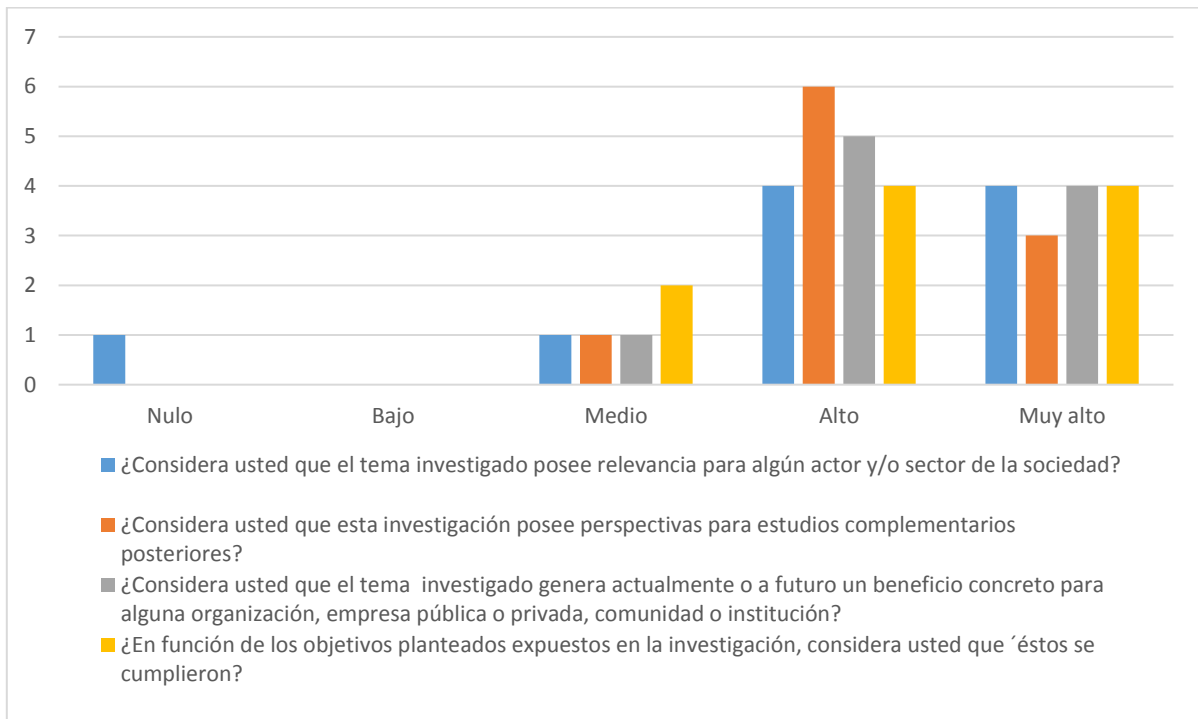


Figura 20: Resultados de la medición de impacto de la investigación.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

- Mediante la investigación realizada se comprobó que si se puede utilizar bacterias *Geobacter sp.* para el tratamiento del agua residual del camal de Otavalo y para la generación de energía eléctrica por lo que se acepta la hipótesis planteada.
- Se caracterizó el agua residual del camal de Otavalo antes de que entre a la planta de tratamiento y se obtuvieron resultados de los parámetros como pH (8.04), DQO (21169 mgL^{-1}), DBO (437 mgL^{-1}), conductividad eléctrica ($1804 \mu\text{scm}^{-1}$), sólidos totales (2605 mgL^{-1}) y turbidez (68.3 NTU), lo que nos indica que el único parámetro que se encuentra dentro de los límites máximos permisibles del libro VI del TULSMA es el pH, los demás medidas sobrepasan los límites por lo cual es necesario aplicar un tratamiento.
- Mediante la construcción de las celdas de combustible microbianas a escala de laboratorio se determinó que el mejor tratamiento para la remoción de la materia orgánica del agua residual del camal fue el T5 (4% del inóculo de bacteria y 500 ml de sustrato), ya que se pudo remover un 48,92% de la materia orgánica con respecto a los demás tratamientos aplicados a las 120 horas.
- Con los ensayos realizados se pudo obtener energía eléctrica, dando los mejores resultados con el tratamiento 1 (2% del inóculo de bacteria y 250 ml de sustrato), ya que se obtuvo un voltaje de 0,56V a las 120 horas, a diferencia de los ensayos realizados con los demás tratamientos, ya que el voltaje decae en el tratamiento 4 (2% del inóculo de bacteria y 500 ml de sustrato) de 0,47V hasta 0,44V.
- La mejor intensidad de corriente se generó en el tratamiento 5 (4% del inóculo de bacteria y 500 ml de sustrato), ya que se obtuvo una intensidad de 0,022 mA a las 120 horas de funcionamiento de las celdas de combustible microbianas, al igual que la mejor densidad de potencia ($0,4456 \text{ mW/m}^2$) se obtuvo en el mismo tratamiento.

CAPÍTULO VII

RECOMENDACIONES

- Reemplazar el puente salino por una membrana de intercambio catiónico ya que mejora el paso de protones debido a que tiene poco menos de 1 mm de espesor y se encuentra cargada negativamente lo que atrae selectivamente a los iones con carga positiva.
- Investigar sobre la microbiología de una biopelícula en la CCM y las implicaciones de la ecología microbiana sobre el funcionamiento del sistema, lo que permitirá explorar nuevos métodos para la producción de energía sustentable y renovable.
- Se recomienda realizar un almacenaje de energía para cada celda mediante un condensador para utilizar posteriormente la energía eléctrica generada.
- Evaluar un mejor diseño de celdas de combustible microbianas que capte un mayor volumen de agua residual a tratar, y que genere mayor cantidad de energía que una celda tradicional, y al mismo tiempo remueva la mayor cantidad de materia orgánica.
- Realizar un tratamiento complementario que podría ser anaerobio para eliminar completamente la materia orgánica en el agua residual del camal.

CAPÍTULO VIII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anguisaca, I. (2015). *Evaluación de bacterias electrogénicas en el tratamiento de aguas residuales de industrias textiles*. (Tesis pregrado, Universidad Central).
- Arcos, C. (2019). *Aislamiento de consorcio bacteriano de la fuente termal de Pucará, perteneciente al cantón Urcuquí- Imbabura para la lixiviación de cobre del proyecto tipo A "Biosensores"*. (Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra).
- Bassante, S. (2018). *Evaluación del efecto de polímeros conductores en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustibles microbianas*. (Tesis de pregrado, Universidad Central).
- Benavides, L. (2006). *Evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales de la central de sacrificio de Túquerrez (Nariño)*. (Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia).
- Buitrón, G. y Pérez, J. (2011). Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos. *Ciencia e Investigación*, 14(1),05-11. Recuperado: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2011000100001
- Busalmen, J. (2010). Bacterias electrogénicas: de los sedimentos a las celdas de combustible microbianas. *Ciencia e Investigación*. Recuperado de: http://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/12626/CONICET_Digital_Nro.15745.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Carmona, A. (2008). *Obtención de energía eléctrica directa de una celda de combustible microbiana mediante el tratamiento de lixiviados de la producción fermentativa de H₂*. (Tesis pregrado, Centro de investigación y de estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional).

- Carrión, G. (2008). Manual Técnico de Difusión Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales para Albergues en Zonas Rurales. *Plan Nacional de Calidad Turística del Perú (CALCUL)*. Recuperado de: https://www.mincetur.gob.pe/Turismo/Otros/cultur/pdfs_documentos_Cultur/Ge
- Cervantes, C. (2011). *Biodegradación de aguas residuales y producción de energía en una celda de combustible microbiana*. (Tesis pregrado, Universidad Autónoma de México).
- Curipallo, M. (2017). *Análisis del bagazo de caña como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes del camal municipal de la ciudad del Puyo, Provincia de Pastaza*. (Tesis pregrado, Universidad Técnica de Ambato).
- Chang, I., Moon, H., Jang, J. y Kim, B. (2005). Improvement of a microbial fuel cell performance as a BOD sensor using respiratory inhibitors. *Biosens Bioelectron*. doi: 1856-1859.
- Cheng, S. (2006). Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing. *Environ. Sci. Technol.*, 2426-2432.
- Escola, B. (2018). *Diseño del sistema de gestión por procesos para el camal del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón de Otavalo*. (Tesis pregrado, Universidad Técnica del Norte).
- Espigares, M. y Pérez, J. (2010). Aguas Residuales. *Composición*. Recuperado de: http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf
- Falcón A., Lozano E. y Juárez K. (2009). Bioelectricidad. *Biotecnología* 13, 62-78.
- Farias, N. (2016). *Análisis técnico – económico de la tecnología de celdas de combustible microbianas para la producción de energías alternas*. (Tesis pregrado, Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica).

- González, A. (2015). *Valorización energética y tratamiento de efluentes residuales mediante celdas de combustible microbiológicas*. (Tesis doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha).
- Harris, D. (2005). *Análisis Químico Cuantitativo 2da. edición*. Reverte. Capítulo 16
- Hernández, G. y Sánchez, M. (2017, 27 de marzo). La plurifuncionalidad de las bacterias electrogénicas. *Energía Alternativa*. Recuperado de: <http://www.uaslp.mx/>
- Huang L., Regan, J. y Quan, X. (2011). Electron transfer mechanism, new applications, and performance of biocathode microbial fuel cells, *Bioresource Technology: 102(1)*, 316-32.
- Humberto, J., Lara, L., Becerril, K., Suárez, S. y Ramírez, N. (2017). Detección y aislamiento de microorganismos exoelectrógenos a partir de lodos del río Lerma, estado de México, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 33 (4) 617-628, DOI: 10.20937/RICA.2017.33.04.06
- LaMotte, (2014). Manual de operaciones de Laboratorio de análisis de agua portátil SMART (1951-02). Texas. Estados Unidos.
- Lara, L. (2011). *Las aguas residuales del camal municipal del Cantón Baños y su incidencia en la contaminación del río Pastaza en la Provincia de Tungurahua*. (Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato)
- Liu, H. y Logan, B. (2004). Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. *Environ. Sci. Technol.* 38, 4040-4046.
- Logan, B. (2008). *Microbial Fuel Cell*. New Jersey: Wiley.
- Logan, B. (2009). Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nature Reviews.* 7, 375-381.

- López, J. (2014). *Desarrollo de una celda de combustible microbiana (CCM) para aplicación en tratamiento de aguas residuales*. (Tesis pregrado, Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica).
- Lovley, D. (2016, 14 de abril). Dissimilatory Fe (III) and Mn (IV) reduction. *Microbiological reviews*. Recuperado de: <http://mmbr.asm.org/content/55/2/259.short#5966>
- Liu, H. y Logan, B. (2010). Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. *Environ. Sci. Technol.* 38, 4040-4046.
- Liu, H., Grot, S., y Logan, B. (2005). Electrochemically assisted microbial production of hydrogen from acetate. *Environ. Sci. Technol.*, 4317-4320.
- Mora, A. y Bravo, E. (2017). Diversidad bacteriana asociada a biopelículas anódicas en celdas de combustible microbianas alimentadas con aguas residuales. *Acta biol. Colomb.* 22(1), 77-84. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v22n1.55766>
- Muñoz, D. (2005). Sistema de tratamiento de aguas residuales de matadero: para una población menor 2000 habitantes. Facultad de Ciencias Agropecuarias. (1). Recuperado de: [Dialnet-SistemaDeTratamientoDeAguasResidualesDeMatadero-6117975%20\(5\).pdf](http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6117975)
- Nakamura, R. y Hashimoto, K. (2009, 25 de septiembre). Harnessing selforganizing bacterial networks for microbial fuel cells. *SPEI*. Recuperado de: <http://spie.org/newsroom/1477-harnessing-self-organizingbacterial-networks-for-microbial-fuel-cells>.
- Nollet, L.M (2007). Manual de análisis de agua: Análisis Bacteriológico del Agua. Recuperado de https://www.academia.edu/3136079/Bacteriological_analysis_of_water
- Núñez, A. (2008). Bacterias productoras de electricidad. *Actualidad SEM*, 34-38

- Ñacato, D. (2018). *Evaluación de la aplicación del campo magnético en la producción de energía eléctrica a partir de la degradación de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbianas tipo batch*. (Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador)
- Oh, S. y Logan, B. (2006). Proton exchange membrane and electrode surface areas as factors that affect power generation in microbial fuel cells. New Jersey: Microbiol. Biotechnol.
- Pistonesi, J., Haure, J. y D'Elmar, R. (2010). *Energía a partir de las aguas residuales*. Argentina, Buenos Aires: Universidad Tecnología Nacional.
- VELP Scientifica, (2015). Demanda Bioquímica de Oxígeno. Milano Italia. Recuperado de: https://www.velp.com/euroNet/contenuti/image/thumb/VELP_BOD_Sensor_Leaflet.pdf
- Rice, R., Baird, A., y Eaton, D. (2017). Estándar methods for the examination of water and wastewater. Recuperado de <https://www.awwa.org/Portals/0/files/publications/documents/2017SMWWLookInside.pdf>
- Ríos, S. (2016). *Generación de bioelectricidad microbiana con estiércol de ganado vacuno, mediante celdas de combustible microbiano, estación experimental tunshi epoch*. (Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo)
- Rea, S. (2017). *Evaluación de la biomasa producida por el tratamiento de aguas residuales domésticas usando celdas de combustible bacteriano (MFCs) como posible abono agrícola*. (Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador).
- Revelo, D., Hurtado, N. y Ruiz, J. (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. Recuperado de: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v24n6/art04.pdf>

- Rodríguez, F. (2000). Realidades y perspectivas de las aguas residuales en el Estado de Zacatecas. Una alternativa de desarrollo ante el nuevo milenio. *Comisión Nacional del Agua*. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/saneab/mexicon/R-0152.pdf>
- Romero, A., Vásquez, J. y González, A. (2012). Bacterias, fuente de energía para el futuro. *Tecnura*. (16), 118-143. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/>
- Ruíz, S. (2011). *Plan de Gestión de Residuos del Camal del Cantón Antonio Ante*. (Tesis pregrado, Escuela Politécnica Nacional).
- Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente. (2019). Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes. Recurso Agua. Recuperado de: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>
- Troncoso, R. (15 de mayo de 2016). Bioelectrogénesis y producción de energía renovable: un paso adelante en la depuración de residuos. *Mundo*. Recuperado de: <http://unmundoderenovables.wordpress.com/http://artiarts.wordpress.com/redaccion@ambientum.com>
- Sharma, Y. y Li, B. (2010). Optimizing energy harvest in wastewater treatment by combining anaerobic hydrogen producing biofermentor (HPB) and microbial fuel cell (MFC), *International Journal of Hydrogen Energy*:35(8),3789-3797.
- Zuo, Y., Maness, P., y Logan, B. (2006). Electricity production from steam-exploded corn stover biomasa. *Energy & Fuels*. 20, 1716-1721.

CAPÍTULO IX

ANEXOS

Anexo 1. Oficio de aceptación de la toma de muestras en el camal de Otavalo.



Otavalo, 29 de mayo del 2019
Oficio N°- 0002- DGAH-GADMCO

Ph.D. Yadira Ordóñez
DIRECTORA ESCUELA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS Y AMBIENTALES
Presente. -

De mi consideración:

Reciba un atento y cordial saludo de quienes conformamos la Dirección de Gestión Ambiental del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Otavalo.

En base a la petición realizada, con N° RDE-2019-C32-0223, donde solicita "*se facilite a la Srta. Melany Cevallos la toma de muestras del agua residual del Camal de Otavalo para la caracterización de aguas debido a que está realizando el trabajo de titulación denominado Evaluación de la bacteria Geobacter en el tratamiento del agua residual del camal de Otavalo*"; me permito informar que:

- El GADMCO tiene como visión la articulación de mecanismos que fomenten la investigación activa conjunta con los diferentes actores de la sociedad sobre todo con la Academia; de esta manera se logrará mitigar la degradación de la calidad de los factores ambientales para garantizar el mantenimiento de un ambiente sostenible y sustentable; en virtud de lo expuesto **se autoriza** la toma de muestras del efluente del proceso de faenamiento del Camal-Municipal para el desarrollo de trabajo de titulación.
- Coordinar con el personal de la dirección, las fechas de toma de muestras
- Además, me permito solicitar la vinculación en la difusión de los resultados a obtener para mejorar y replicar los estudios científicos que se desarrollan en la jurisdicción del Cantón Otavalo en pro de la sociedad.

Particular que pongo en su conocimiento, para los fines pertinentes.

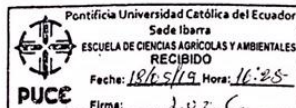
Atentamente;



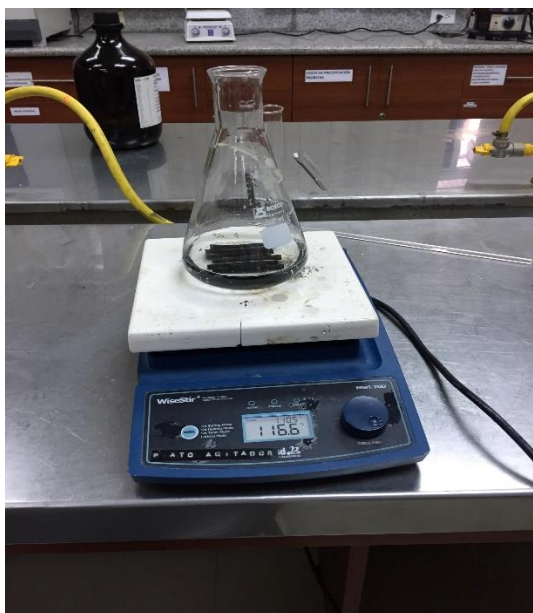
Dra. Olga Farfango Lita

DIRECTORA DE GESTION AMBIENTAL E HIGIENE

OF/jg



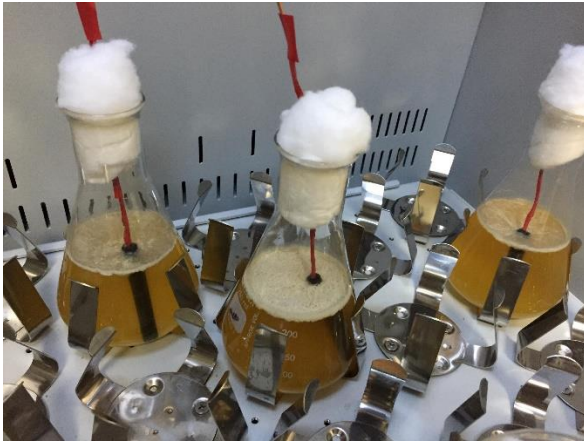
Anexo 2. Tratamiento de electrodos.



Anexo 3. Preparación de la solución para el puente salino.



Anexo 4. Crecimiento del biofilm.



Anexo 5. Filtración del agua residual del camal de Otavalo.



Anexo 6. Celdas de combustible microbianas de 500 ml.



Anexo 7. Medición del parámetro de DQO.



Anexo 8. Socialización de la investigación.



Anexo 9. Encuesta de la socialización de la investigación



Pontificia Universidad
Católica del Ecuador

ESCUELA CIENCIAS AGRÍCOLAS Y AMBIENTALES
ÁREA DE VINCULACIÓN CON LA COMUNIDAD

PROCESO DE SOCIALIZACIÓN DE INVESTIGACIÓN

El siguiente cuestionario nos permitirá implementar mejoras constantes en los procesos de socialización de trabajos de investigación, por favor háganos llegar sus comentarios y sugerencias:

FECHA			
EXPOSITOR			
LUGAR	DENTRO PUCESI		FUERA PUCESI

NOTA IMPORTANTE: Por favor conteste las preguntas según la siguiente escala:

5. MUY ALTO / 4. ALTO / 3. MEDIO / 2. BAJO / 1. NULO

DETALLE DE VALORACIÓN	1	2	3	4	5
ORGANIZACIÓN DEL EVENTO DE SOCIALIZACIÓN:					
1. ¿Considera Usted que la sala donde se desarrolló este evento brindó las comodidades necesarias?					
2. ¿Considera Usted que el material audiovisual utilizado en la presentación fue adecuado?					
EJECUCIÓN DEL EVENTO POR PARTE DEL EXPOSITOR					
3. ¿Considera Usted que el expositor mostró dominio del tema?					
4. ¿Estima Usted que el manejo del auditorio por parte del expositor fue adecuado?					
5. ¿Considera Usted que el Expositor demostró facilidad de expresión?					
MEDICIÓN DE IMPACTO DE LA INVESTIGACIÓN:					
6. ¿Considera Usted que el tema investigado posee relevancia para algún actor y/o sector de la sociedad?					
7. ¿Considera Usted que esta investigación posee perspectivas para estudios complementarios posteriores?					
8. ¿Considera Usted que el tema investigado genera actualmente o a futuro un beneficio concreto para alguna organización, empresa pública o privada, comunidad o institución?					
9. ¿En función de los objetivos planteados expuestos en la investigación, considera Usted que éstos se cumplieron?					
REALICE UN COMENTARIO O SUGERENCIA PARA LOS ORGANIZADORES DE ESTE EVENTO					
MENCIONE USTED OTRAS PROBLEMÁTICAS QUE A SU PARECER PODRÍAN SER INVESTIGADAS Y QUE POSEAN IMPORTANCIA PARA ALGÚN ACTOR Y/O SECTOR DE NUESTRA COLECTIVIDAD					

--

INSTITUCIÓN U ORGANIZACIÓN A LA QUE PERTENECE EL ENCUESTADO	
---	--

Anexo 10. Listado de participantes presentes en la socialización de la investigación.



LISTA DE ASISTENCIA A SOCIALIZACIÓN DE INVESTIGACIÓN

NOMBRE DEL EXPOSITOR:
CARRERA:
FECHA:

NOMBRE ASISTENTE	NÚMERO DE CÉDULA	INSTITUCION A LA QUE REPRESENTA	FIRMA
Jaidy Gamboa Salas	0802633594	PUCE-SI	<i>[Signature]</i>
Gissela Samander	1004114094	PUCE-SI	<i>[Signature]</i>
Melany Pitacuar	1004616817	PUCE-SI	<i>[Signature]</i>
Oscar Méndez	1004338966	PUCE-SI	<i>[Signature]</i>
Melanie Andrade	1004363108	PUCE-SI	<i>[Signature]</i>
Ingrid Puente	1050178985	PUCE-SI	<i>[Signature]</i>
Gabriela Veloz	1004438063	PUCE-SI	<i>[Signature]</i>
Daménica Gutiérrez	0401796669	PUCE-SI	<i>[Signature]</i>
Daménica Blomquist	0604018614	PUCE-SI	<i>[Signature]</i>
Karla Rivera	1003968979	PUCE-SI	<i>[Signature]</i>
Shael Farinango C.	10027271-5	PUCE-SI	<i>[Signature]</i>

CS Scanned with CamScanner