

Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y Biotecnológicas

Escuela Profesional de Ingeniería Biotecnológica



EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO ELECTROQUÍMICO Y BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES PROVENIENTES DE LA ACTIVIDAD MINERA

Tesis presentada por la Bachiller:
Diaz Rodriguez, Karla Fiorella

Para optar el Título Profesional de:
Ingeniera Biotecnóloga

Asesor:
Dr. Roque Rodriguez, Francisco Javier

Arequipa – Perú

2019

FORMATO UNICO PARA TRAMITACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

DE: DIAZ RODRIGUEZ, Karla Fiorella

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO BIOTECNOLOGO

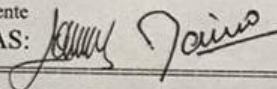
"DESARROLLO DE UN SISTEMA ELECTROQUIMICO Y BIOLOGICO DE EFLUENTES MINEROS PROVENIENTES DEL SUR MEDIO DEL PERU"

DICTAMINADORES: Dr. José Villanueva Salas 2) Mgter. Jaime Barreda del Carpio

DICTAMEN DE PLAN: Señor Decano de la Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y Biotecnológicas, en atención a su designación, el Jurado Dictaminador del Plan de Tesis informa que: hechas las observaciones y subsanadas las correcciones; consideramos se encuentra APTO para continuar con el trámite de acuerdo al Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad

Atentamente

FIRMAS:



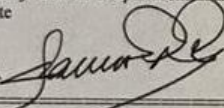
FECHA 10/12/18

ASESOR: Dr. Francisco Roque Rodríguez

DICTAMEN ASESORÍA: Señor Decano de la Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y Biotecnológicas, en atención a su designación como asesor del trabajo de investigación presentado por la recurrente, tengo a bien informar que luego de verificado el cumplimiento de los objetivos y la redacción del informe con los resultados, discusión y conclusiones correspondientes y debiendo cambiar el título a: "EVALUACION DEL TRATAMIENTO ELECTROQUIMICO Y BIOLOGICO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES PROVENIENTES DE LA ACTIVIDAD MINERA", considero que el presente trabajo está APTO para continuar con el trámite, en conformidad al Reglamento de Grados y Títulos de nuestra Facultad

Atentamente

FIRMA



FECHA 2/12/2019

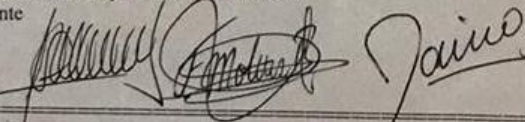
DICTAMINADORES BORRADOR DE TESIS:

- 1) Dr. José Villanueva Salas
- 2) Dr. Fredy Molina Rodríguez
- 3) Mgter. Jaime Barreda del Carpio

DICTAMEN FINAL: Señor Decano de la Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y Biotecnológicas, atendiendo a su designación como Dictaminadores del presente Borrador de Tesis y luego de hechas las observaciones y correcciones pertinentes, cumpliendo con las exigencias mínimas establecidas para un trabajo de investigación de Tesis profesional, es que consideramos APTO para continuar con los trámites estipulados en el Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad.

Atentamente

FIRMA



FECHA

9/12/19

JURADOS: PRESIDENTE DR. JOSE VILLANUEVA SALAS
VOCAL DR. FREDY MOLINA RODRIGUEZ
SECRETARIO MAG. JAIME BARREDA DEL CARNIO

FECHA

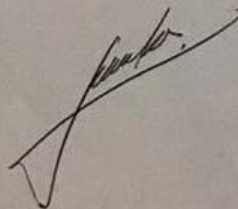
12/12/19

HORA

19.00

LOCAL C-402

FIRMA DEL DECANO



FECHA

DEDICATORIA

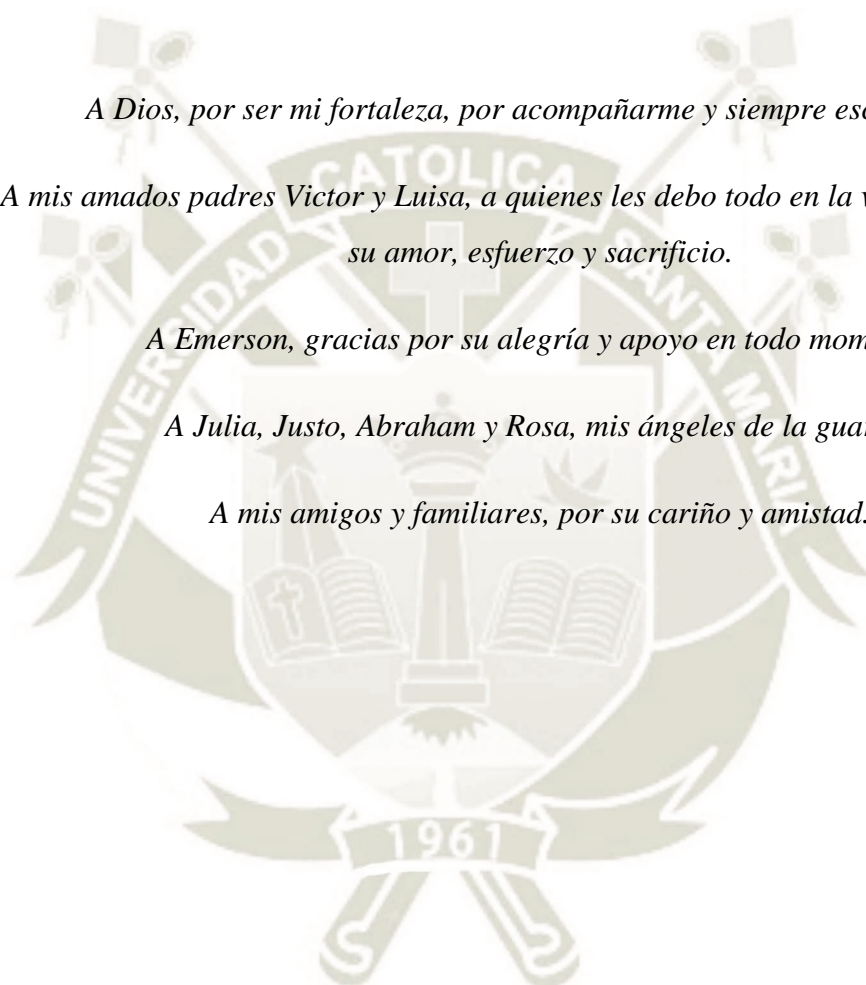
A Dios, por ser mi fortaleza, por acompañarme y siempre escucharme.

A mis amados padres Victor y Luisa, a quienes les debo todo en la vida, gracias por su amor, esfuerzo y sacrificio.

A Emerson, gracias por su alegría y apoyo en todo momento.

A Julia, Justo, Abraham y Rosa, mis ángeles de la guarda.

A mis amigos y familiares, por su cariño y amistad.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica - CONCYTEC y al Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico e Innovación Tecnológica – FONDECYT, por el haber logrado ser una de las accesitarias en el Programa de Movilización Nacional o Internacional de Investigadores e Innovadores en CTel.

A la Universidad Tiradentes, Instituto de Tecnología y Pesquisa, Aracaju, Brasil, por haberme permitido acceder a sus laboratorios e instalaciones, de manera muy especial al Dr. Giancarlo Richard Salazar Banda y a la Dra. Katlin Barrios Eguluz quienes me permitieron formar parte de su equipo y sentirme parte de su familia, agradezco también a la Dra. Eliane Bezerra Cavalcanti, Dr. Luis Fernando Romanholo y al Dr. Luiz Pereira da Costa, infinitas gracias a todas las personas que me brindaron su amistad y cariño durante mi estancia en Brasil.

Al Laboratorio Proyecto Mercurio, en especial al Dr. José Villanueva Salas por su apoyo en todo momento.

Al Dr. Javier Roque Rodriguez, por haberme guiado durante toda mi etapa universitaria.

A mis jurados, al Dr. Fredy Molina y el Mg. Jaime Barreda por el apoyo y recomendaciones en este proyecto.

A todas las personas que hicieron posible la realización de este proyecto.



RESUMEN

Las diversas actividades productivas que en su mayoría utilizan agua en alguna parte de su proceso, generan aguas residuales industriales que en ciertos casos son vertidos al medio ambiente sin ningún tipo de tratamiento.

La combinación de aplicar tratamientos electroquímicos y biológicos puede ser aplicada en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria minera por tener resultados superiores a emplear un solo método de tratamiento.

Se desarrolló un sistema electroquímico a escala laboratorio a temperatura y presión constante utilizándose aguas residuales industriales mineras empleando electrodos de aluminio, estas muestras fueron evaluadas a distintas intensidades de corriente 100 mA, 300 mA y 500 mA y a variaciones de pH 4, 6 y 8, luego del tratamiento se realizó la evaluación del efluente, demanda química de oxígeno (DQO) y carbono orgánico total (COT), así como la evaluación de los electrodos con microscopia electrónica de

barrido (MEB) y difracción de rayos X (DRX), presentando porcentajes de remoción alrededor del 80%.

Se evaluó la capacidad de crecimiento del hongo *Pleurotus sajor caju* previamente repicado a diferentes porcentajes de concentración del agua residual (25, 50, 100%).

Asimismo, al tratamiento electroquímico más eficaz se inoculó el hongo *Pleurotus sajor caju*, de la misma forma se evaluó DQO y COT.

Además se realizó una prueba de toxicidad con semillas de lechuga a las cuales se midió el tamaño de la plántula y la raíz, de esta manera se valora la calidad del agua residual industrial.

Palabras clave:

Tratamiento electroquímico, agua residual industrial minera, DQO, COT, *Pleurotus sajor caju*, MEB, DRX.

ABSTRACT

The various productive activities that mostly use water in some part of their process, contain industrial wastewater that in certain cases are discharged into the environment without any treatment.

The combination of applying electrochemical and biological treatments can be applied in the treatment of wastewater from the mining industry for having superior results to a unique treatment method.

According to a laboratory-scale electrochemical system at constant temperature and pressure using industrial mining wastewater using aluminum electrodes, these samples were evaluated at different current intensities 100 mA, 300 mA and 500 mA and variations in pH 4, 6 and 8, After the treatment, the evaluation of the effluent, chemical oxygen demand (COD) and total organic carbon (TOC) was performed, as well as the evaluation of the electrodes with scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffractometry (DRX), presenting removal rates around 80%.

The growth capacity of the fungus *Pleurotus sajor caju* previously repeated at different percentages of residual water concentration (25, 50, 100%) was evaluated.

Likewise, the *Pleurotus sajor caju* fungus was inoculated with the most effective electrochemical treatment, in the same way COD and TOC were evaluated.

In addition, a toxicity test was carried out with lettuce seeds to which the size of the seedling and root was measured, thus assessing the quality of industrial wastewater.

Keywords

Electrochemical treatment, mining effluent, DQO, TOC, *Pleurotus sajor caju*, MEB, DRX

INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales industriales pueden contener numerosos agentes contaminantes orgánicos e inorgánicos que son caracterizados por distintos métodos analíticos.

Aunque se trata de elementos naturales, un elevado contenido de materia orgánica puede causar contaminación en el efluente, se requiere oxígeno disuelto en el agua para los procesos de descomposición de la materia orgánica, de esta manera el oxígeno deja de estar disponible para flora y fauna lo que causa un desequilibrio en el ecosistema, se puede utilizar métodos indirectos para medir la materia orgánica como la oxidación térmica, oxidación química y oxidación bioquímica, dentro de la oxidación térmica se tiene a la determinación del carbono orgánico total (COT) y dentro de la oxidación química se tiene la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO).

Una de las actividades económicas más importantes alrededor del mundo es la minería artesanal (ASM), ha tomado más impulso en los últimos años en nuestro país, millones de operadores de ASM en todo el mundo producen unas 400 toneladas anuales de oro, lo que representa el 17-20% de la producción oficialmente registrada, sin embargo a pesar de las utilidades que esta actividad genera, existe una gran preocupación debido a los efluentes que son vertidos al ambiente de manera indiscriminada y sin ningún tratamiento, contaminando suelos y cuerpos de agua.

Existe una amplia variedad de métodos para el tratamiento de efluentes residuales industriales como son los tratamientos electroquímicos que por medio de la aplicación de electricidad se libera el coagulante que atraparán a los contaminantes y por la generación de burbujas de hidrógeno estos serán atrapados y llevados a la superficie, de igual forma la biotecnología y su aplicación para la remediación de aguas contaminadas, busca que con la acción de microorganismos o seres vivos se eliminen o reduzcan la cantidad de contaminantes presentes.

La presente investigación busca remediar efluentes residuales industriales de una minera artesanal aurífera empleando un sistema electroquímico y biológico de manera secuencial determinando y comparando la eficiencia de los tratamientos.



ABREVIATURAS

Abs	Absorbancia
ASM	Minería artesanal
CCIBt	Coleção de Culturas de Algas, Cianobactérias e Fungos do Instituto de Botânica
CIT	Carbono inorgánico total
COT	Carbono orgánico total
CT	Carbono total
DQO	Demanda química de oxígeno
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno
DRX	Difractometría de rayos X
ITP	Instituto de Tecnologia e Pesquisa
MEA	Malt extract agar
MEB	Microscopía electrónica de barrido
NTU	Unidades nefelométricas de turbidez
SST	Sólidos suspendidos totales

ÍNDICE

RESUMEN	iv
ABSTRACT	vi
INTRODUCCIÓN	vii
ABREVIATURAS	ix
CAPÍTULO I	1
PLANTEAMIENTO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos	2
HIPÓTESIS	3
VARIABLES.....	3
Variables independientes	3
Variables dependientes	3
Unidades de estudio	3
1. MARCO TEÓRICO	4
1.1. Minería artesanal del oro	4
1.2. Agua residual industrial	7
1.3. Electroquímica Ambiental.....	8
1.4. Electroquímica	9
1.4.1. Electroquímica del aluminio.....	9
1.4.3. Electroquímica y microorganismos	11
1.5. Demanda química de oxígeno (DQO):.....	11
1.6. Carbono orgánico total (COT)	12
1.7. Microscopía electrónica de barrido (MEB)	14
1.8. Difractometría de rayos X (DRX)	15
1.9. Hongos de pudrición blanca	18
CAPÍTULO II.....	20
PLANTEAMIENTO OPERACIONAL DE LA INVESTIGACIÓN	20
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
2.1. Campo de investigación	21

2.1.1.	Lugar de investigación	21
2.2.	Materiales.....	21
2.2.1.	Muestras y/o unidades biológicas:	21
2.2.2.	Material de Laboratorio:	21
2.2.3.	Insumos y reactivos químicos:	22
2.2.4.	Equipos e instrumentación:	22
2.3.	Métodos.....	22
2.3.1.	Recolección de muestras de agua residual industrial proveniente de minería aurífera artesanal.	22
2.3.2.	Diseño y evaluación de un sistema electroquímico escala laboratorio.	23
2.3.3.	Evaluación de crecimiento del hongo <i>Pleurotus sajor caju</i>	26
2.3.4.	Evaluación del sistema electroquímico y biológico.	27
CAPÍTULO III.....		29
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		29
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
3.1.	Recolección de muestras de efluente de minería aurífera artesanal.....	30
3.2.	Diseño y evaluación de un sistema electroquímico escala laboratorio.....	33
3.3.	Evaluación del crecimiento del hongo <i>Pleurotus sajor caju</i>	56
3.4.	Evaluación del sistema electroquímico y biológico	58
CAPÍTULO IV		66
CONCLUSIONES		66
4.	CONCLUSIONES	67
REFERENCIAS		69
ANEXOS		76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros del Tratamiento	33
Tabla 2. Revisión bibliográfica para determinar densidad de corriente	35
Tabla 3. Datos utilizados para la curva patrón de DQO.....	77
Tabla 4. Porcentaje de remoción de DQO para la muestra A	78
Tabla 5. Porcentaje de remoción de DQO para la muestra B.....	79
Tabla 6. Porcentaje de remoción de COT para la muestra A	80
Tabla 7. Porcentaje de remoción de COT para la muestra B	81
Tabla 8. DQO Relación entre Intensidad de corriente y muestras A y B.....	82
Tabla 9. DQO Relación entre pH y muestras A y B	82
Tabla 10. DQO Relación entre tiempo (min) y muestras A y B	82
Tabla 11. DQO Correlación de Pearson.....	83
Tabla 12. COT Relación entre Intensidad de corriente y muestras A y B	84
Tabla 13. COT Relación pH y muestras A y B.....	84
Tabla 14. COT Relación entre tiempo y muestras A y B.....	84
Tabla 15. Correlación de Pearson TOC muestras A y B.....	85
Tabla 16. Medida de halo de crecimiento de Pleurotus sajor caju en muestra A	86
Tabla 17. Medida de halo de crecimiento de Pleurotus sajor caju en muestra B	87
Tabla 18. DQO muestra A luego del tratamiento electroquímico.....	88
Tabla 19. DQO muestra B luego del tratamiento electroquímico	88
Tabla 20. COT muestra A luego del tratamiento electroquímico	89
Tabla 21. COT muestra B luego del tratamiento electroquímico.....	89
Tabla 22. Porcentaje de reducción DQO y COT total de la muestra A.....	90
Tabla 23. Porcentaje de reducción DQO y TOC total de la muestra B	91
Tabla 24. Promedios de crecimiento L. Sativa para muestra A y B.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

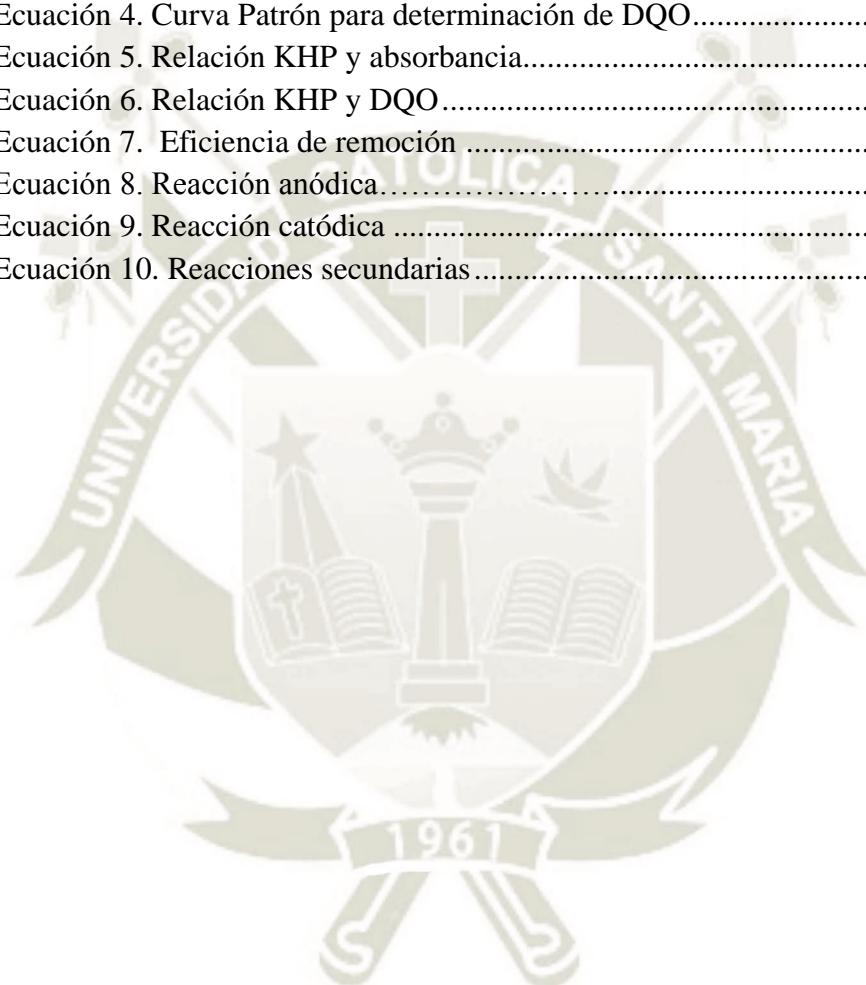
Figura 1. Proceso de extracción de oro en la minería artesanal	6
Figura 2. Diagrama de Pourbaix, Potencial- pH para el sistema aluminio-agua a 25°C	10
Figura 3. Esquema del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)	15
Figura 4. Representación esquemática de la Ley de Bragg.....	16
Figura 5. Diagrama de bloques del equipo DRX	17
Figura 6. Mapa georeferenciado Santa Filomena.....	30
Figura 7. Aguas residuales industriales mineras codificadas como A y B.....	32
Figura 8. Electrodo de aluminio	34
Figura 9. Sistema electroquímico representación AutoCAD	36
Figura 10. Sistema electroquímico escala laboratorio.....	37
Figura 11. Digestor y espectrofotómetro UV para determinación de DQO	38
Figura 12. Gráfica de calibración para DQO	39
Figura 13. Porcentaje de remoción de DQO con respecto al tiempo, muestra A	42
Figura 14. Porcentaje de remoción de DQO con respecto al tiempo, muestra B	44
Figura 15. Equipo TOC-L para determinación de COT.....	45
Figura 16. Porcentaje de remoción de COT con respecto al tiempo, muestra A.....	46
Figura 17. Porcentaje de remoción de COT con respecto al tiempo, muestra B	48
Figura 18. Muestra A, MEB del electrodo (A) 100 mA, pH 6, 500x; (B) 100 mA, pH 6, 1000x;(C) 300 mA, pH 8, 500 x; (D) 300 mA, pH 8,2000x; (E) 500 mA, pH 6, 500x; (F) 500 mA, pH 6, 2000x.....	50
Figura 19. Muestra B, MEB del electrodo (A) 100 mA, pH 4, 500x; (B) 100 mA, pH 4, 1000x;(C) 300 mA, pH 8, 500 x; (D) 300 mA, pH 8,1000x; (E) 500 mA, pH 6, 500x; (F) 500 mA, pH 6, 2000x.....	52
Figura 20. DRX muestra A, (A) 100 mA, (B) 500 mA.....	54
Figura 21. DRX muestra B, (A) 100 mA, (B) 300 mA, (C) 500 mA.....	55
Figura 22. Dilución de efluente; 5, 10, 25, 50 y 100%	56
Figura 23. Dilución de efluente en placa Petri; 5, 10, 25, 50 y 100%	56

Figura 24. Concentración del efluente con respecto al crecimiento del hongo, muestra A y B.....	58
Figura 25. Eficiencia de remoción DQO y COT de las muestras A y B.....	60
Figura 26. Esquema del proceso de obtención de DQO y COT.....	61
Figura 27. Índice de germinación y crecimiento relativo de la raíz con respecto a la concentración de muestra A.....	63
Figura 28. Índice de germinación y crecimiento relativo de la raíz con respecto a la concentración de muestra B.....	64



ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ley de Bragg.....	16
Ecuación 2. Crecimiento relativo de la raíz	27
Ecuación 3. Índice de germinación	27
Ecuación 4. Curva Patrón para determinación de DQO.....	39
Ecuación 5. Relación KHP y absorbancia.....	40
Ecuación 6. Relación KHP y DQO	40
Ecuación 7. Eficiencia de remoción	40
Ecuación 8. Reacción anódica	53
Ecuación 9. Reacción catódica	53
Ecuación 10. Reacciones secundarias.....	53





CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar un sistema electroquímico y biológico secuencial en aguas residuales industriales mineras que cumpla con las características para lograr una disminución de la carga orgánica y carbono orgánico total de la solución.

Objetivos específicos

- Diseñar un equipo Batch a escala de laboratorio, con electrodos de aluminio, que permita evaluar el proceso electroquímico de las aguas residuales industriales mineras.
- Evaluar la morfología y composición de los electrodos por Microscopia Electrónica de Barrido y Difractometría de Rayos X.
- Obtener la mejor concentración de efluente industrial minero para el crecimiento del hongo *Pleurotus sajor caju*.
- Analizar la reducción de la Demanda Química de Oxígeno y el Carbono Orgánico Total de un sistema electroquímico y biológico.
- Establecer el bioensayo de ecotoxicidad para determinar la calidad del agua residual industrial minera tratada electroquímica y biológicamente.

HIPÓTESIS

Debido a que la electroquímica y la biotecnología son ciencias en las que se ha demostrado niveles aceptables de eficiencia en la remoción de contaminantes, es probable que utilizando un tratamiento electroquímico y biológico secuencial para efluentes industriales mineros se obtenga una mejor calidad de agua tratada.

VARIABLES

Variables independientes

- Tiempo
- pH
- Intensidad de corriente
- Voltaje

Variables dependientes

- DQO
- COT
- Amperaje

Unidades de estudio

En este trabajo se utilizaron como unidades de estudio aguas residuales mineras, para la aplicación del tratamiento electroquímico con electrodos de aluminio y para el tratamiento biológico con el hongo *Pleurotus sajor caju*.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Minería artesanal del oro

La minería artesanal produce 17 toneladas de oro al año, representando anualmente 150 millones de dólares a esto sumarle la producción de minerales no metálicos y materiales de construcción, es por ello que para muchos artesanos es una oportunidad única para la reducción de la pobreza, generación de empleo y el desarrollo local(1). El Perú es el sexto productor mayor de oro en el mundo al cierre del año 2018, y entre el 15 al 20 % de esta producción se debe a minería artesanal de oro(2).

Sin embargo algunos problemas surgen entorno a la minería artesanal aurífera:

- Contaminación por mercurio: Incorrecta utilización del mercurio, tanto en la fase de preparación de la amalgama como en la del quemado o “refogado” de la misma, originando emisiones considerables de mercurio al medio ambiente, este al contacto con el ambiente se convierte en metilmercurio, que es un potente neurotóxico.
- Contaminación del agua: El agua se utiliza en los quimbaletes y se mezcla con las rocas y el mercurio, una vez que se logra obtener amalgama, el efluente resultante es derivado a ríos o suelos, provocando una gran contaminación en el ambiente.
- Acumulación de cascajo y grava: Existe un gran movimiento de suelos, remoción de estos, y la erosión forzada de suelos, así como la acumulación de toda esta materia después del lavado de la grava durante el proceso de recuperación de oro.
- Deforestación: La alteración y/o destrucción parcial o total de la vegetación, a esto sumarle el uso de mercurio altera los suelos logrando un suelo infértil y con posibilidades de nunca volver a generar vegetación. Se conoce que hasta el año 2012 cincuenta mil hectáreas de bosques han sido

devastadas por la minería ilegal solo en la cuenca del río Madre de Dios(2)
(3).

La minería artesanal se diferencia de la minería ilegal en los siguientes puntos:

- La minería ilegal está en zonas no permitidas, estas pueden ser áreas naturales protegidas, campos de comunidades nativas, campesinas o indígenas, donde se desarrolla la actividad minera, sin embargo la minería artesanal se puede realizar en zonas permitidas para esta actividad.
- Se sabe que la minería artesanal se puede legalizar siempre y cuando no esté en una zona no permitida, aquella minería artesanal que esté en zonas no permitidas automáticamente pasa a ser minería ilegal, sin poder cambiar a minería legal.

La minería artesanal es una actividad económica que se ha intensificado a través de los años en el Perú, sin embargo hasta la fecha se emplea el mercurio para un buen recobro del oro. El proceso de amalgamación para recuperar el oro consiste en hacer evaporar el mercurio para obtener el oro arrastrado por este, se sabe que se pierde mercurio en el proceso de molienda o de amalgamación entre 5 kg a 10 kg de mercurio (en casos extremos hasta 25 kg) para recuperar 1 kg de oro, de esta manera se elimina el mercurio en forma de gas (vapor de mercurio)(4).

El mercurio en la naturaleza y provenientes de la industria, se encuentra principalmente de forma inorgánica, su comportamiento geoquímico es muy complejo debido a reacciones químicas, biológicas, y fotoquímicas en el medio ambiente(5, 6). El mercurio se puede presentar en diversas formas químicas, dependiendo de características fisicoquímicas, debido a sus propiedades se distinguen tres principales grupos; compuestos volátiles, especies reactivas y no reactivas(7).

En la Figura 1 se puede observar gráficamente el proceso de extracción de oro en la minería artesanal, así como el ciclo del mercurio dentro de esta actividad minera(8).

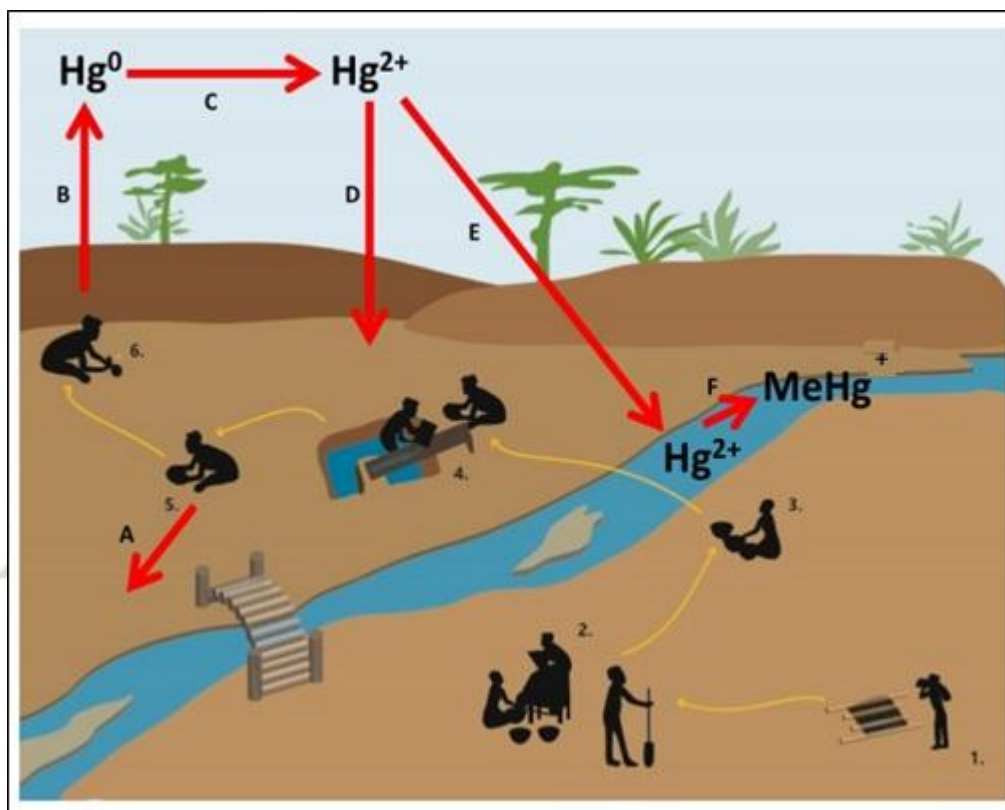


Figura 1. Proceso de extracción de oro en la minería artesanal

Los números representan el proceso de extracción de oro en una minera artesanal; 1: excavación, 2: aplastamiento y molienda, 3: tamizado / agitado, 4: lavado / escurrimiento, 5: amalgamación y 6: refogue. Las letras representan pasos clave en el ciclo del mercurio: A: mercurio residual de la amalgamación puede desecharse en el suelo y el agua locales, B — volatilización de elementos elementales mercurio a la atmósfera, C: oxidación del mercurio elemental, D:

depósito en el local sistemas terrestres, E: deposición en sistemas acuáticos locales, F: metilación de compuestos inorgánicos mercurio a metilmercurio.

Hoy, se acepta que la metilación de Hg ocurre principalmente bajo condiciones anaeróbicas y que bacterias reductoras de sulfato gobiernan principalmente este proceso de metilación(9).

El mercurio inorgánico no se transfiere fácilmente en redes alimenticias y no biomagnifica, sin embargo el mercurio como forma de metilmercurio si, los organismos acuáticos obtienen metilmercurio del agua, sedimento y comida, siendo una neurotoxina, puede causar diversos efectos negativos como falta de coordinación, falta de apetito o comportamiento de alimentación, disminución de la natación actividad, hambre y eventualmente la muerte(10).

1.2. Agua residual industrial

A nivel mundial, la escasez de agua dulce es un problema creciente y los recursos hídricos naturales se están volviendo inadecuados para satisfacer la demanda mundial. El crecimiento de la población aumentará la demanda de agua tanto urbana como industrial, lo que puede generar la descarga de distintos efluentes con distintos tipos de contaminantes que influyen en la DQO, DBO₅, COT, NTU, SST, niveles de metales pesados Cd, Pb, Ni, Hg, Zn y crecimiento microbiano como coliformes fecales o salmonella(11). Las industrias contribuyen al uso del 19% del agua total en el mundo, y se dice que para el 2050 la demanda mundial de agua en consumo y uso industrial aumentará más de 50% principalmente por la demanda industrial(12).

El Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) señala a las aguas residuales industriales aquellas que provienen del desarrollo productivo de

distintas actividades como; la actividad minera, agrícola, energética agroindustrial, entre otras(13).

Se realizó un estudio en Perú, donde dos casos de estudios de mineras artesanales auríferas se vieron reflejadas, la primera en Mazuko, Madre de Dios y la segunda en Lucanas, Ayacucho, en esta segunda el consumo de agua es de 7.5 m^3 por kg de oro obtenido en el año 2004-2005(14).

Existen muchos contaminantes asociados con la minería artesanal entre ellos sedimentos suspendidos, materia orgánica, drenaje ácido, metales pesados, grasas, aceites y combustibles(15).

1.3. Electroquímica Ambiental

La electroquímica ambiental es parte fundamental de la Ingeniería Electroquímica, disciplina científica y tecnológica cuyo objetivo de estudio es el diseño y operación de los equipos y procesos para la conversión entre energía química y eléctrica(16).

La electroquímica es empleada en diferentes industrias, tal es el caso de la obtención de cloro y soda caustica, procesos de electrorefinado de metales mejorando la calidad de los metales, producción de algunos medicamentos y de polímeros. Asimismo, es importante desde el punto de vista de las nuevas soluciones energéticas, como las celdas de combustibles consiguiendo una conversión más eficiente de la energía química contenida en un combustible en energía eléctrica(17).

La electroquímica desarrolla una rama específica para el medio ambiente en donde se encarga del tratamiento de efluentes líquidos contaminados, electrorremediación de suelos y en el tratamiento de efluentes gaseosos. En general, los procesos electroquímicos de remediación ambiental presentan una

serie de ventajas, que contienen un buen grado de competencia con otros métodos de tratamiento (biológicos, fotoquímicos, entre otros)(18).

1.4. Electroquímica

La electroquímica propone enfoques prometedores para problemas de contaminación en la industria de procesos, siendo su principal ventaja la compatibilidad ambiental debido a su principal reactivo “el electrón”(19).

El tratamiento electroquímico del agua está representado principalmente por oxidación y reducción electroquímica, electrocoagulación, electroflotación y electrodiálisis(20).

1.4.1. Electroquímica del aluminio

El aluminio es el elemento más abundante de la corteza terrestre, es un material plateado blanco perteneciente al grupo II de la tabla periódica, con número atómico 13 y peso atómico 26.98, además es un material anódico muy atractivo debido a su almacenamiento de energía y conversión(21).

En la Figura 2 se puede observar el diagrama de Pourbaix del aluminio, se observa que el aluminio metal es estable en ácido soluciones solo cuando el potencial es inferior a - 1,8 V. En potenciales más altos, el aluminio se disuelve en ácidos y En el rango de pH de 4 a 9 y a potenciales superior a - 2,0 V, el aluminio se oxida para formar óxido de aluminio, que efectivamente pasiva la superficie del metal de la corrosión adicional. Más allá del rango de pH de 4–9, el óxido se disuelve en ácidos y bases, formando iones Al_3 simples y solubles $Al(OH)_4$ o AlO_2 , respectivamente(21).

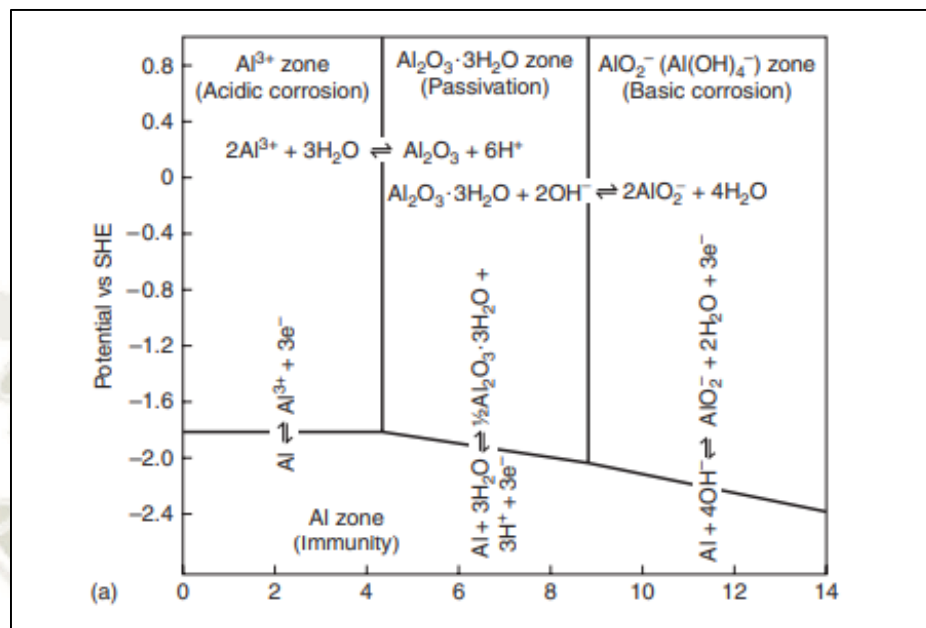


Figura 2. Diagrama de Pourbaix, Potencial- pH para el sistema aluminio-agua a 25°C

Cuando en un tratamiento electroquímico los electrodos son de aluminio, la disolución del ánodo produce especies como Al^{+3} , $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$, los cuales producen espontáneamente los respectivos hidróxido o polihidróxidos, que formados en estas reacciones electroquímicas tienen una gran afinidad por partículas dispersas e iones, lo que permite la coagulación. Y los gases formados son los que realizan la flotación del material coagulado(22).

1.4.2. Densidad de corriente

En los procesos electroquímicos la densidad de corriente determinará la tasa de producción de coagulantes además del tamaño y cantidad de burbujas, esto influirá en la cantidad de flóculos producidos en el sistema(23).

Existen autores que indican influencia sobre la densidad de corriente y la remoción de contaminantes, sin embargo algunos reportan que la densidad de corriente no influye significativamente sobre la eliminación de contaminantes(24).

Si la densidad de corriente es mayor, mejor será la superficie del electrodo utilizada y más rápida será la velocidad de disolución electroquímica del metal. Las densidades de corriente más altas aumentan la eficiencia de corriente de la disolución del metal anódico y también mejoran la producción de burbujas de hidrógeno en el cátodo, lo que facilita la flotación de los flóculos de hidróxido; cuanto mayor es la densidad de corriente aplicada, mayor será la polarización y pasivación de los electrodos, lo que conduce al aumento de potenciales y pérdida de energía para los procesos secundarios. Los electrodos de hierro son más propensos a la pasivación que los de aluminio(25).

1.4.3. Electroquímica y microorganismos

Se ha demostrado que la combinación entre microorganismos y electroquímica puede ser de gran utilidad en distintos campos, uno de ellos la bioelectrorremediación, esta técnica se basa en el transporte dirigido de contaminantes, nutrientes, aceptores de electrones y microorganismos transformadores de contaminantes en el sitio contaminado(26).

1.5. Demanda química de oxígeno (DQO):

La DQO es un parámetro químico, determina la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua en condiciones

específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo, la DQO se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro ($\text{mg O}_2/\text{L}$)(27).

El cambio de la concentración de la materia orgánica, se describe para describir la muerte bacteriana y el método más empleado para obtener este parámetro es el que involucra el reflujo de una muestra en un fuerte ácido con un exceso de dicromato de potasio, que no mide específicamente el contenido orgánico en la muestra, sino la cantidad de oxígeno requerida para la oxidación, por lo tanto proporciona una medida directa de la impacto potencial del consumo de oxígeno en el oxígeno contenido del cuerpo de agua(28).

Se basa en la reacción de una muestra de agua contaminada, con un oxidante energético, como es el dicromato potásico, en medio ácido, con ácido sulfúrico con Ag^+ como catalizador y la valoración por colorimetría de la cantidad de dicromato consumida en este proceso. Los compuestos orgánicos oxidables actúan reduciendo el dicromato, Cr (VI), a ion crómico Cr (III). La cantidad de dicromato consumido proporciona una medida de la concentración de contaminantes en el agua. La utilización de la colorimetría (absorción visible-ultravioleta) para la determinación de la DQO en esta práctica se basa en los diferentes espectros de absorción del Cr (VI) (de color naranja, absorbe en longitudes de onda en torno a 440 nm y el Cr (III) (de color verde, absorbe en torno a 600 nm), por lo que ambas especies se pueden detectar independientemente(29).

1.6. Carbono orgánico total (COT)

La materia orgánica natural está presente en todo tipo de aguas superficiales y poco profundas. Se originan en el suelo donde se han acumulado materia vegetal en descomposición o descomposición de animales, algunos productos del metabolismo de algas y hongos entre otros, la materia orgánica natural es una

matriz compleja de materiales orgánicos, (sustancias húmicas, ácidos fúlvicos, y humina, polisacáridos y proteínas(30) (31).

Las aguas con importante concentración de materia orgánica de procedencia natural, son a menudo acidas y están poco mineralizadas, ya que provienen de terrenos cuarzosos o mineralizados. Esta materia orgánica se expresa como contenido de carbono orgánico, se sabe que ningún método para determinar demanda de oxígeno da una estimación del carbono orgánico disuelto en el agua, lo cual hace inevitable utilizar una técnica para determinar este parámetro(32). La técnica utilizada es la combustión total de la materia orgánica a CO_2 y detección de este producto en el detector infrarrojo no dispersivo. La muestra se prepara por acidificación y aireación para remover el carbono inorgánico, luego se inyecta la muestra tratada en un horno donde se evapora el agua y el carbono orgánico hace combustión catalítica a CO_2 , el cual es transportado por una corriente de aire hasta el detector, cuya señal es una variación de voltaje proporcional a la concentración de COT(33). El COT se utiliza comúnmente como indicador de calidad del agua cruda destinada al tratamiento de potabilización y como indicador de la materia orgánica que permanece remanente después de los procesos destinados a su eliminación durante el proceso de potabilización y se constituye como precursora en la formación de subproductos de desinfección al entrar en contacto con el cloro aplicado como desinfectante(34). El aporte de carbono total en muestras de agua lo hacen tanto sustancias orgánicas como inorgánicas. El CI consiste en carbonatos y CO_2 disuelto en agua. El CO total consiste en carbono orgánico volátil o purgable y el carbono orgánico no volátil o no purgable.(35) El COT dará a conocer la suma de todo el CO presente en los compuestos. Existen varios métodos para la medición de COT, sin embargo, todos tienen dos objetivos en común: 1) oxidar el carbono orgánico a dióxido de carbono, y 2) medir el dióxido de carbono generado. Existen métodos habituales de oxidación, se encuentran los agentes químicos (como el persulfato), la combustión (normalmente ayudada por un catalizador), la

exposición a radiación ionizante (como la luz ultravioleta), la exposición a calor o alguna combinación de estos métodos(36).

1.7. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

La herramienta utilizada es el microscopio electrónico de barrido, permite el análisis de materiales orgánicos e inorgánicos de tamaño micro o nanométrico, además se puede obtener imágenes tridimensionales.(37).

Generalmente se utiliza el MEB para observar imágenes en el rango de 10-10 000x(38). La MEB puede realizar aumentos de 100 000 con un filamento térmico convencional o hasta de 1 000 000 con una fuente de emisión de campo, la MEB utiliza un haz de electrones escanea sobre una muestra, la interacción del haz de electrones y la muestra producirá electrones retrodispersados, electrones secundarios y rayos X, al medir el flujo de este tipo de partículas, se puede mostrar la imagen o el mapa de la muestra(39). Durante muchos años ha habido una tendencia creciente hacia el uso de MEB con energías de haz más bajas y se espera que esta tendencia continúe(40).

La MEB es una técnica común utilizada para estudiar la caracterización morfológica y de superficie, y examinar el tamaño de las partículas metálicas a escala de nano y micro nivel(41).

Como se muestra en la Figura 3, los dos mayores componentes del MEB, son la columna de electrones y la consola de control. La columna de electrones consiste en una pistola de electrones y dos o más láseres de electrones, que influyen en las rutas de los electrones que viajan por un tubo evacuado. La base de la columna generalmente se toma con bombas de vacío que producen un vacío de aproximadamente 10^{-4} Pa (aproximadamente 10^{-6} torr, o aproximadamente una milmillonésima de presión atmosférica). La consola de control consta de una pantalla de visualización del tubo de rayos catódicos (CRT) y las perillas y el teclado de la computadora que controlan el haz de electrones(38).

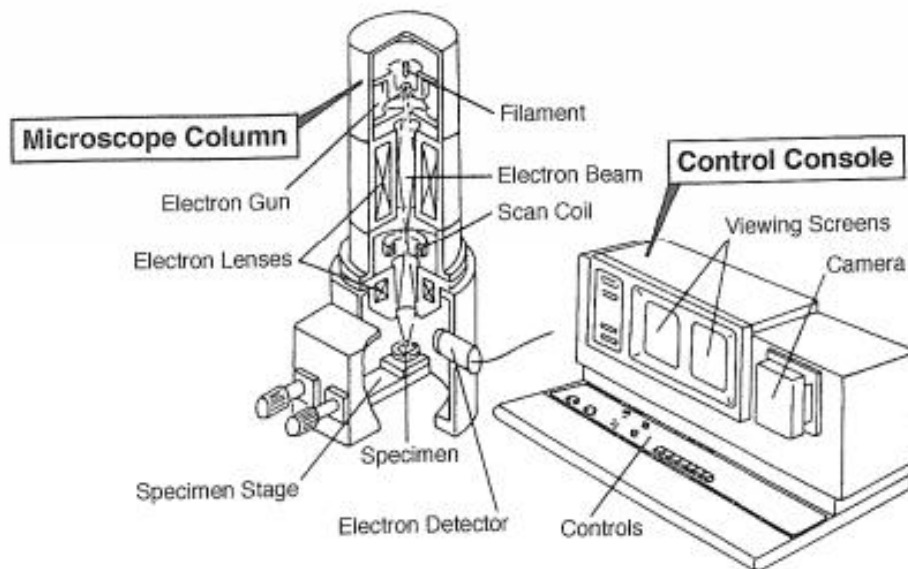


Figura 3. Esquema del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

1.8. Difractometría de rayos X (DRX)

El descubrimiento de los Rayos X de Rontgen surgió en el año 1895 y en 1912 la DRX ya estaba en uso para determinar la estructura cristalina. El trabajo de Max von Laue y el equipo padre-hijo de W.L. y W.H. Bragg proporcionaron demostraciones e interpretaciones de la física detrás de DRX y han permitido una diversidad de refinamientos, generalizaciones y simplificaciones del método. Como resultado, DRX es ahora una herramienta cuantitativa, versátil y ubicua que se ha utilizado en la ciencia y la ingeniería(42).

La DRX, proporciona información sobre la estructura y la composición de un material(43). Puede dar información estructural a nivel atómico, permite el análisis de materiales cristalinos y no cristalinos, el análisis es de naturaleza no destructiva, puede analizar muestras en forma de polvo, sólida y líquida. La DRX de un solo

crystal, se emplea para la determinación de la estructura química absoluta(44). El ángulo que se da entre el rayo incidente y el rayo difractado se da como 2θ (42).

La DRX es la dispersión elástica de los fotones de rayos X por átomos en una red periódica. Los rayos X monocromáticos dispersos que están en fase dan una interferencia constructiva. En la Ecuación 1 se muestra la ley de Bragg(45).

$$n\lambda = 2d \text{ sen } \theta \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

θ = ángulo de incidencia

λ =longitud de onda

d = distancia interplanar de los planos paralelos considerados

n = número entero igual o mayor que uno, es el orden de difracción.

Las mediciones se realizan en Angstroms, donde 1Angstrom es igual a 0.1nm, por lo tanto, la DRX es una herramienta de caracterización primaria para obtener información sobre características críticas como la estructura cristalina, la identificación de fase de la estructura cristalina o el tamaño del cristalito(41).

La Figura 4 ilustra como la DRX por planos cristalinos permite derivar espacios en red utilizando la ley de Bragg(45).

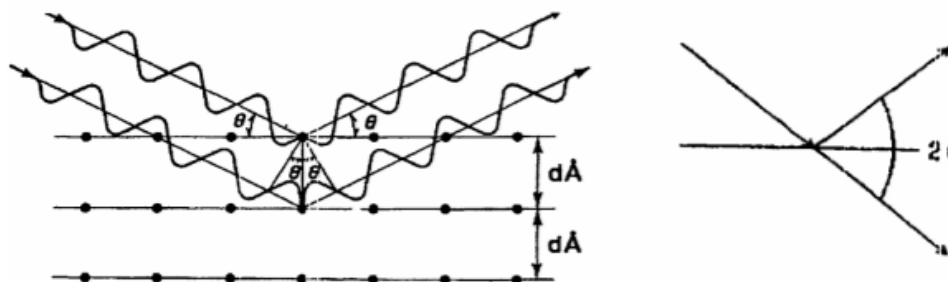


Figura 4. Representación esquemática de la Ley de Bragg

La Figura 5 ilustra la representación esquemática de un equipo de DRX, está compuesto principalmente por una carcasa compacta protegida contra rayos X, un goniómetro, un transformador de alto voltaje para tubos de rayos X, tubos de rayos X con filtros, un generador de rayos X altamente estable, un detector y un sistema de procesamiento de datos. Los tubos de rayos X pueden tener diferentes objetivos de radiación como Mo, Cu, Co, Fe, Cr y W, con diferentes filtros k_{β} como Zr para Mo, Ni para Cu, Fe para Co, Mn para Fe y V para Cr; los tubos pueden ser de foco fino normal, amplio o largo. Según el objetivo y la naturaleza del foco, la carga máxima de los tubos de rayos X generalmente oscila de 1 a 3 kW, mientras que el voltaje va de 0 a 60 kV y la corriente del tubo están en el rango de 0 a 80 mA; los monocromadores de haz primario hechos de cuarzo para eliminar radiaciones indeseables y los monocromadores secundarios formados por cristales planos de LiF, o cristales de grafito curvados más ampliamente ajustados para la radiación Cr, Co, Fe o Cu para eliminar la radiación fluorescente de las muestras se utilizan en los caminos de haz incidente y difractado, respectivamente, junto con diferentes rendijas (tipos fijo, variable y de soldadura)(45).

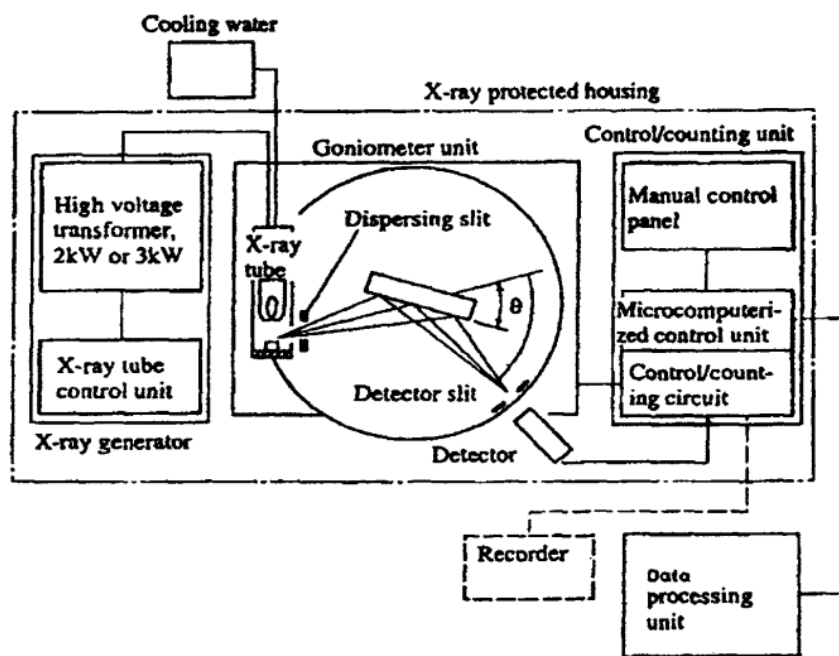


Figura 5. Diagrama de bloques del equipo DRX

1.9. Hongos de pudrición blanca

Los hongos de pudrición blanca son un grupo clasificado en el filo Basidiomycetes en la clase Agaricomycetes, existen alrededor de 10 000 especies de hongos de pudrición blanca, con capacidades de degradar lignina, celulosa y hemicelulosa, existen algunas familias más estudiadas, Phanerochaetaceae, Poliporaceae, Marasmiaceae, Pleurotaceae, Hymenochaetaceae, Ganodermataceae, Meruliaceae(46).

Los hongos causantes de pudrición blanca se caracterizan por poseer un grupo de enzimas capaces de degradar la lignina de la madera conocidas como ligninasas o enzimas ligninolíticas. La Lignina es lo que da a la madera el característico color marrón, que al ser degradada por estos hongos se va enriqueciendo en celulosa cuyo color es blanco y de ahí el nombre de este tipo de pudrición. Dentro de este grupo de enzimas ligninolíticas hay oxidasas y peroxidasas cuya función es comenzar el ataque a la lignina mediante fuertes oxidaciones(47).

Se puede distinguir dos tipos de hongos de podredumbre blanca:

- a. Los simultáneos: Degradan celulosa, hemicelulosa y ligninas.
- b. Los selectivos: Degradación de ligninas y hemicelulosas(48).

Existen diversas aplicaciones biotecnológicas con los hongos de pudrición blanca, por ejemplo en el pretratamiento de biomasa lignocelulósica en la producción de biocombustibles, biolixiviación de madera pulpa para reemplazar la tradicional designificación a base de cloro no ecológica, decoloración de tintes en la industria textil, degradación de herbicidas, entre otras(49).

Las enzimas producidas por los hongos de pudrición blanca son las peroxidasas fúngicas como la lignina peroxidasa, manganeso peroxidasa, peroxidasas versátiles y otras peroxidasas; las lacasas; las enzimas auxiliares para la

producción de peróxido de hidrógeno como la glyoxal oxidasa, aryl alcohol oxidasas y finalmente las celobiosas deshidrogenasas(48).





CAPÍTULO II
PLANTEAMIENTO OPERACIONAL DE LA
INVESTIGACIÓN

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Campo de investigación

2.1.1. Lugar de investigación

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Electroquímica y Nanotecnología, Laboratorio de Tratamiento de Efluentes y residuos sólidos en el Instituto de Tecnología y Pesquisa de la Universidad Tiradentes, en la ciudad de Aracaju – Brasil.

2.2. Materiales

2.2.1. Muestras y/o unidades biológicas:

Efluentes minero auríferos, Hongo *Pleurotus sajor caju*.

2.2.2. Material de Laboratorio:

Balón 100 mL, vaso de precipitado 1000 mL, vaso de precipitado 500 mL, vaso de precipitado 100 mL, bureta 50 mL, cinta colorimétricas de ph, electrodos de aluminio, embudo de vidrio, fiola 100 mL, fiola de 50 mL, gasa estéril, matraz 500 mL, micropipetas de 20 μ L, 200 μ L, 1000 μ L, papel filtro Whatman, pinzas, placas petri, probeta 100 mL, probeta 500 mL, termómetro

digital, tips para micropipeta de 20 μ L, 200 μ L, 1000 μ L, tubos de centrifuga de 12 mL, tubos falcon.

2.2.3. Insumos y reactivos químicos:

Ácido de potasio, ácido sulfúrico concentrado, dicromato de potasio, medio MEA, sulfato mercuríco.

2.2.4. Equipos e instrumentación:

Agitador orbital, Autoclave, Balanza Analítica, Baño termostático marca Ethiktechnology, Centrifuga, Conductímetro – Digimed modelo DM-3P., Difractómetro de rayos X – modelo Rigaku, Espectrofotómetro de UV-VIS, Estufa, Fuente de Alimentación Regulable – Avast PS-5000, Microscopio Electrónico de Barrido, Multiparámetro, TOC – L Shimadzu / Total Organic Carbon Analyzer.

2.3. Métodos

2.3.1. Recolección de muestras de agua residual industrial proveniente de minería aurífera artesanal.

Las muestras de agua residual, fueron tomadas de una minera aurífera artesanal, ubicada entre Arequipa y Ayacucho. Estas fueron trasladadas en

recipientes de plástico, para su preservación se le agrego ácido nítrico concentrado, en relación de 3 gotas por 500 ml de efluente.

2.3.2. Diseño y evaluación de un sistema electroquímico escala laboratorio.

Para el tratamiento electroquímico se utilizó una fuente de alimentación regulable, y se colocó dos electrodos (cátodo y ánodo) de aluminio, estos tuvieron la dimensión de 2.5 x 1.5 cm, haciendo un área de 3.75 cm² por cada lado, teniendo como resultado un área total de 7.5 cm²; los amperajes usados fueron 100 mA, 300 mA y 500 mA. Además de variar la intensidad de corriente se hicieron pruebas a distintos pH; 4, 6 y 8. Se conectó los electrodos dentro de la celda electroquímica, de capacidad de 40 mL, esta celda cuenta con un sistema externo de tuberías para la entrada y salida de agua, logrando que el efluente minero se mantenga a una temperatura de 25°C. La celda tuvo agitación constante a 200 rpm. Se realizó nueve tratamientos por cada muestra, tomándose cinco alícuotas a diferentes tiempos (0, 15, 30, 45 y 60 minutos), para luego ser almacenadas en tubos eppendorf cubiertos con papel aluminio y posteriormente fueron sometidos a refrigeración hasta su análisis.

Se realizó el análisis de DQO y COT luego de cada tratamiento electroquímico.

2.3.2.1. Determinación de la Demanda Química de oxígeno

La metodología para evaluar DQO fue estandarizada por el laboratorio de control de calidad del Instituto de Tecnología e Pesquisa, Aracaju-Brasil, basándose en el protocolo de American Public Health Association, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater(50). Para la

evaluación del DQO, se utilizó el método de dicromato por espectrofotometría que consiste en:

- a. Solución de digestión (solución sulfocrómica): Adicionar 500 mL de agua destilada 10.2 g de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), previamente seco en estufa a $105^\circ C$ por 2 horas, 167 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), 33.3 g de sulfato de mercurio ($HgSO_4$). Disolver y enfriar y completar con agua destilada en balón volumétrico de 1000 mL.
- b. Reactivo de ácido sulfúrico (solución de plata): Adicionar sulfato de plata (Ag_2SO_4) cristal o poner en H_2SO_4 en una proporción de 5.5 g de Ag_2SO_4 por kg de ácido sulfúrico concentrado. Dejar en reposo por uno o dos días para la disolución completa.
- c. Solución patrón de Biftalato de potasio (KHP): Separar una cantidad de biftalato de potasio ($C_8H_5KO_4$), secar a $120^\circ C$ por 2 horas, pesar 427.0 mg y disolver en aproximadamente 500 mL de agua destilada y completar el volumen para 1000 mL en balón volumétrico. (Esta solución es estable hasta por 3 meses guardada en refrigeración)

El procedimiento de esta técnica es la siguiente:

Se adicionó 1.5 mL de solución de digestión en el tubo de DQO. Inmediatamente se agregó 3.5 mL de la solución de plata y 2.5 mL de la muestra pura con ayuda de una micropipeta, para un DQO menor que 800 mg/L. Se cerró y agito perfectamente cada tubo. Colocarlo en el digestor a $150^\circ C$ por 2 horas luego de este tiempo se dejó enfriar los tubos por algunos minutos y se procedió a hacer las lecturas en espectrofotómetro UVVI a 600 nm. El blanco se preparó reemplazando los 2.5 mL de muestra por 2.5 mL de agua destilada.

- **Análisis estadístico SPSS**

Para la evaluación de la DQO de las muestras A y B se comparó el grado de significancia con el software SPSS versión 23.0.

2.3.2.2. Determinación de Carbono Orgánico Total

Se diluyó la muestra 1:100 y se realizó la determinación de TOC midiendo directamente en el equipo.

- **Análisis estadístico SPSS**

Para la evaluación de la COT de las muestras A y B se comparó el grado de significancia con el software SPSS versión 23.0.

2.3.2.3. Análisis de electrodos por Microscopia Electrónica de Barrido

Una vez realizado el tratamiento electroquímico, se realizó la evaluación morfológica de los electrodos de aluminio, para lo cual se utilizó el microscopio electrónico de barrido en la Universidade Federal de Sergipe, Brasil.

2.3.2.4. Análisis de electrodos por Difractometría de Rayos X

De igual forma, se realizó el análisis de composición de los electrodos en el difractómetro de rayos X marca Rigaku, en la Universidade Federal de Sergipe, Brasil.

2.3.3. Evaluación de crecimiento del hongo *Pleurotus sajor caju*

El hongo utilizado fue donado gentilmente de la Coleção de Culturas de Algas, Cianobactérias e Fungos del Instituto de Botânica (CCIBt), Sao Paulo. Este hongo es repicado cada tres meses para poder ser conservado adecuadamente en el Instituto de Tecnologia e Pesquisa, Universidade Tiradentes, Aracaju. En primer lugar, se preparó medio MEA; se agregó 30,0 g de extracto de malta, 3,0 g de peptona de harina de soja y 15,0 g de agar, siendo añadido 1000 mL de agua destilada, autoclavado a 121 ° C / 1 atm durante 15 minutos. Se hicieron repiques de este hongo, en 5 placas Petri y se dejó crecer por un periodo de 10 días. A partir de las muestras A y B, se evaluó el mejor crecimiento del hongo *Pleurotus sajor caju*. En cuatro Erlenmeyer de capacidad 100 mL se preparó 60 mL de medio compuesto por efluente a diferentes concentraciones 5, 10, 25, 50 y 100% y se agregó 1.8g de agar. Se llevó a autoclave a 121 ° C / 1 atm durante 15 minutos; con las medidas de limpieza necesarias dentro de una cabina de flujo laminar se procedió a agregar el medio preparado a placas Petri, por cada concentración de efluente se utilizaron 3 placas, una vez listo el medio se procedió a colocar 1 cm² de hongo en medio de la placa. Se dejó actuar al hongo durante 7 días dentro de una estufa a temperatura de 28°C. Una vez pasado los 7 días se midió el halo de crecimiento del hongo en centímetros. El mejor crecimiento de halo fue elegido para luego preparar el efluente a esta concentración, preparando en un Erlenmeyer 100 mL de suspensión y colocando 5 cm² de hongo, se dejó en un agitador orbital a 28 °C, se dejó actuar al hongo durante 7 días y se procedió a medir DQO y TOC.

2.3.4. Evaluación del sistema electroquímico y biológico.

Luego de someter el efluente al sistema electroquímico, se tomó el tratamiento con mejor eficiencia de remoción de DQO y COT y se sometió a tratamiento biológico preparando en un Erlenmeyer 100 mL de suspensión y colocando 5 cm² de hongo, se dejó en un agitador orbital a 28 °C, se dejó actuar al hongo durante 7 días y se procedió a medir DQO y COT.

2.3.4.1. Bioensayo de ecotoxicidad

Una vez realizado el tratamiento bioelectroquímico, se eligió el tratamiento con los mejores resultados y se realizó un bioensayo de ecotoxicidad. Se colocaron 20 semillas de *Lactuca sativa* (lechuga), dentro de una placa de Petri, sobre papel filtro. Las muestras de efluente tratado se diluyeron en 4 concentraciones diferentes: 25, 50, 75 y 100%. Para cada dilución se prepararon tres replicados. Una placa negativa con NaCl. Solo a partir de la germinación del 90% de semillas se consideró válido. Encima del papel filtro se agregó 4 mL de disolución, estas placas fueron incubadas durante 5 días a 22°C, finalmente las longitudes de raíz se midieron. Los resultados fitotóxicos se evaluaron para el crecimiento relativo de la raíz (RRG) y el índice de germinación (GI).

$$RRG(\%) = \frac{L_1}{L_2} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

$$GI(\%) = \frac{L_1 G_1}{L_2 G_2} \times 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

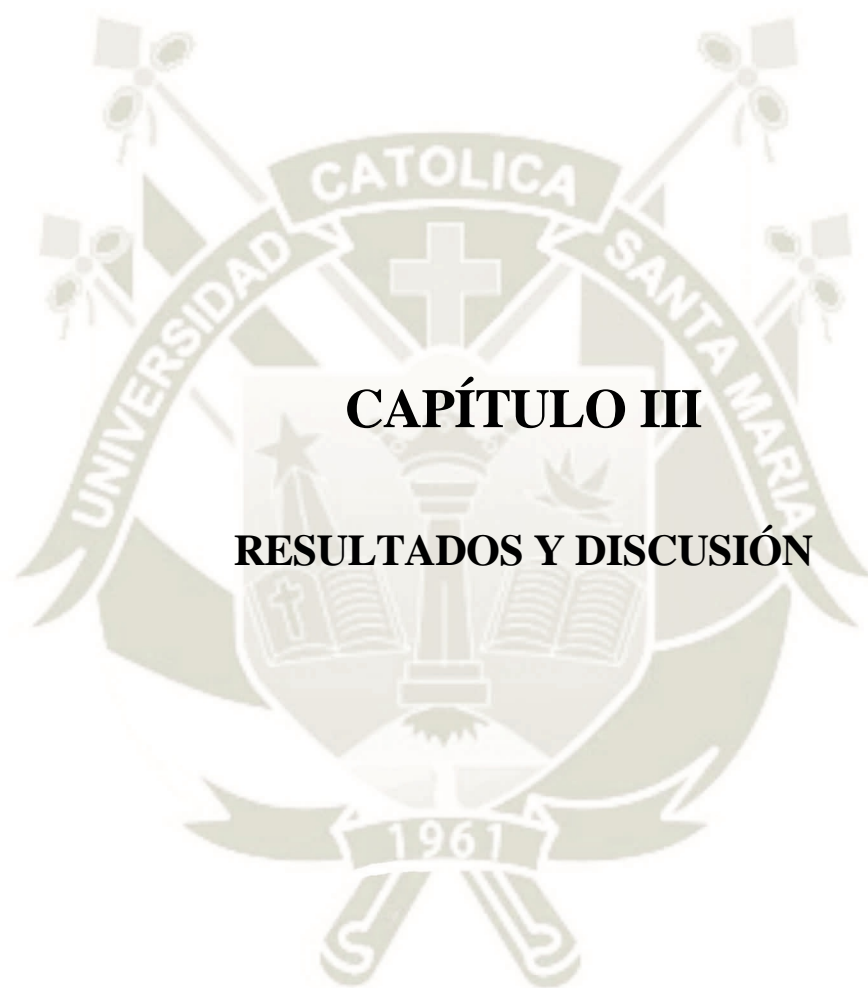
G_1 = número de semillas germinadas en contacto con la solución de prueba

L_1 = longitud promedio de la raíz originada en contacto con la solución de prueba

G_2 = número de semillas germinadas en contacto con la solución de control

L_2 = longitud promedio de la raíz originada en contacto con la solución de control





CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Recolección de muestras de efluente de minería aurífera artesanal.

Las muestras de efluente para realizar el estudio se obtuvieron de la zona ubicada en el centro poblado Santa Filomena, distrito de Sancos, Provincia de Lucanas en el departamento de Ayacucho en el límite del departamento de Arequipa. En la Figura 6 se puede observar la ubicación de la zona donde se obtuvieron las muestras está representada por las coordenadas UTM

- 577676.01 E - 8301575.14 N

Estas coordenadas corresponden a la Zona 18, banda L (Datum WGS84)



Figura 6. Mapa georeferenciado Santa Filomena

Las muestras de efluente utilizadas, provienen del procesamiento de rocas mineralizadas con oro, las rocas se definen como agregados naturales que se

encuentran cohesionados por uno o más tipos de minerales, se clasifican considerando principalmente su proceso de formación y se tiene tres tipos principales de rocas como son: rocas ígneas, rocas sedimentarias y rocas metamórficas. El principal tipo de roca presente en la corteza terrestre viene a ser la roca sedimentaria representando el 66%, el 34% corresponde a las rocas ígneas y metamórficas.(51) El origen de la roca sedimentaria consiste en material orgánico y sedimentos no consolidados depositados en la superficie de la tierra, los cuales son posteriormente enterrados, comprimidos y cementados (diagénesis), tienen como característica presentar estratificaciones, lo cual significa que están superpuestos capa sobre capa, cada capa tiene una composición, color o textura diferente, capas con iguales características conforman una secuencia estratigráfica. Cada capa dentro de la secuencia estratigráfica puede variar en grosor desde milímetros hasta varios metros de grosor.(52) Geológicamente la zona está representado por secuencias de rocas sedimentarias, las cuales se correlacionan con el Grupo Yura, este relleno sedimentario está conformado por material de origen volcánico, volcano-sedimentario y sedimentario de edad Triásico, Jurásico y Cretáceo.(53) Las rocas sedimentarias del Grupo Yura se caracterizan por presentar bancos gruesos de cuarcitas con coloraciones blanquecinas o grises, que contienen restos de plantas, en su mayoría mal conservadas.

En este conjunto de rocas sedimentarias se presenta intercalaciones de Lutitas pizarrosas negras en capas que varían entre 1 a 3 m de espesor. La parte inferior del grupo Yura está representado principalmente por sedimentos calcáreos (Rocas Caliza). (54) El Grupo Yura tiene una génesis que proviene en parte del Grupo Ambo (reciclamiento de sedimentos) esto se sustenta en la similitud de sus elementos accesorios como son las turmalinas y los anfíboles.(53)

El mencionado Grupo Ambo geológicamente se encuentra conformado por secuencias litológicas de areniscas lutitas carbonáceas, se realizaron análisis en las rocas del grupo Ambo los cuales nos indican un promedio de TOC de 17%, se determinó la presencia de materia orgánica terrestre, y la presencia de material

orgánico algal lacustre(55). La muestra utilizada está compuesta por sedimentos de rocas que tienen una génesis con contenido de material orgánico, como es el caso de las rocas lutitas y calizas las cuales conforman en gran parte al Grupo Yura.

Como se muestra en la Figura 7, se tomaron dos muestras de efluente las cuales fueron codificadas como A y B, estas son el resultado del material extraído de 2 vetas de la zona, las cuales la minera artesanal aurífera utiliza para su producción.

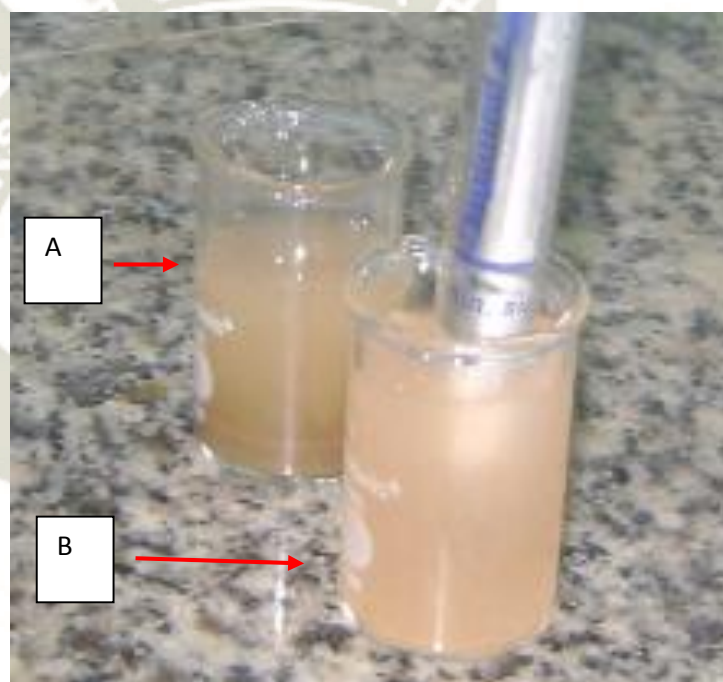


Figura 7. Aguas residuales industriales mineras codificadas como A y B

Inicialmente se caracterizó las aguas residuales, se tomó valores de pH, siendo 5.97 y 7.59 y también conductividad eléctrica, siendo 1028 y 1244 $\mu\text{S}/\text{cm}$, de la muestra A y B respectivamente. Ambas aguas residuales no presentaban olor, sin embargo la coloración observada fue marrón en ambas, una tonalidad más oscura en la muestra A.

3.2. Diseño y evaluación de un sistema electroquímico escala laboratorio.

Un tratamiento electroquímico tiene una variedad de ventajas con respecto a métodos convencionales de tratamiento, dentro de sus objetivos es lograr el desarrollo sostenible siendo un tratamiento relativamente económico para el tratamiento aguas residuales contaminadas, además los tratamientos electroquímicos tienen alta eficiencia en la eliminación de partículas y puede ser un sistema de tratamiento compacto(56) (57).

Se definieron los parámetros del tratamiento electroquímico, en la Tabla 1 se observa el diseño experimental de las distintas intensidades de corriente y los pH elegidos para el sistema.

Tabla 1. Parámetros del Tratamiento

Intensidad de corriente (A)	pH del efluente
100 mA	pH 4
	pH 6
	pH 8
300 mA	pH 4
	pH 6
	pH 8
500 mA	pH 4
	pH 6
	pH 8

Se realizó una sola repetición debido al costo que implicaba el análisis de cada una de las variables en el sistema.

En la Figura 8 se puede observar la fotografía de los electrodos empleados. El material de los electrodos (cátodo y ánodo) utilizados fue de aluminio, este material fue elegido debido a su gran capacidad de remoción. Además las cantidades de erosión y consumo de aluminio son menores comparadas con otros materiales como el hierro; haciendo que la reducción de DQO sea menor cuando se utiliza electrodos de hierro que cuando se utiliza electrodos de aluminio(58).

Los electrodos de aluminio son utilizados para el proceso de electrocoagulación debido a que se disuelven dando origen a iones metálicos, los cuales forman hidróxidos o polihidróxidos, excelentes agentes coagulantes, desestabilizantes de las sustancias coloidales(22).

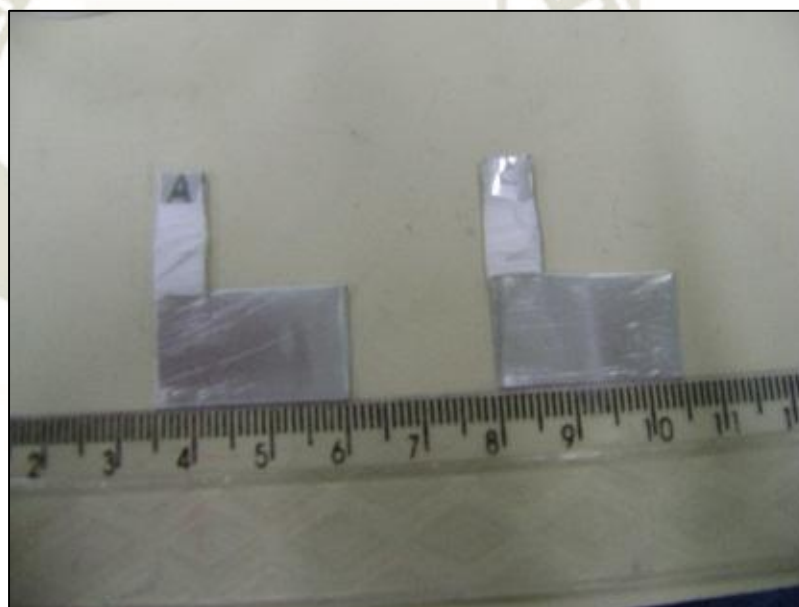


Figura 8. Electrodos de aluminio

El área total de los electrodos fue de 7.5 cm^2 , con este dato se puede obtener la densidad de corriente (mA/cm^2). La densidad de corriente fue de 13.3, 40.0 y $66.7 \text{ mA}/\text{cm}^2$ para 100, 300 y 500 mA respectivamente.

Las intensidades de corriente (mA), fueron elegidas debido a la bibliografía existente como muestra la Tabla 2.

Tabla 2. Revisión bibliográfica para determinar densidad de corriente

Material de electrodos	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Referencia
Acero de carbono / Al	600	Rincon y La Motta (2014) (59)
Fe/Fe	14	Gatois y col. (2015) (60)
Fe/Fe	6	Mansoorian y col. (61)
Fe/Fe	10	(62)
Al/Al	6 a 12	Shafaei y col. (2011) (63)
Al/Al	1.5 a 9	Shafaei y col. (2010) (23)

Se hizo pruebas preliminares con tiempos de hasta 120 minutos, sin embargo a este tiempo el electrodo en el proceso electroquímico desapareció, por lo que el tiempo máximo de tratamiento será 60 minutos. Se diseñó el reactor a escala laboratorio en el programa AutoCAD 2013 (Figura 9), donde se define tres partes

en el sistema, la primera parte del sistema; la fuente de alimentación regulable que dará las diferentes intensidades de corriente aplicables en el sistema unido a los electrodos de aluminio, la segunda parte ; la celda electroquímica con una capacidad de 40 mL, esta celda cuenta con un sistema externo para la entrada y salida de agua para que el efluente minero que se encuentra en el interior de la celda se encuentre a una temperatura de 25°C que es la temperatura estándar para el sistema, y esta celda colocada en un agitador magnético que trabajara a 200 rpm y la tercera parte, el baño termostático tipo chaqueta del sistema.

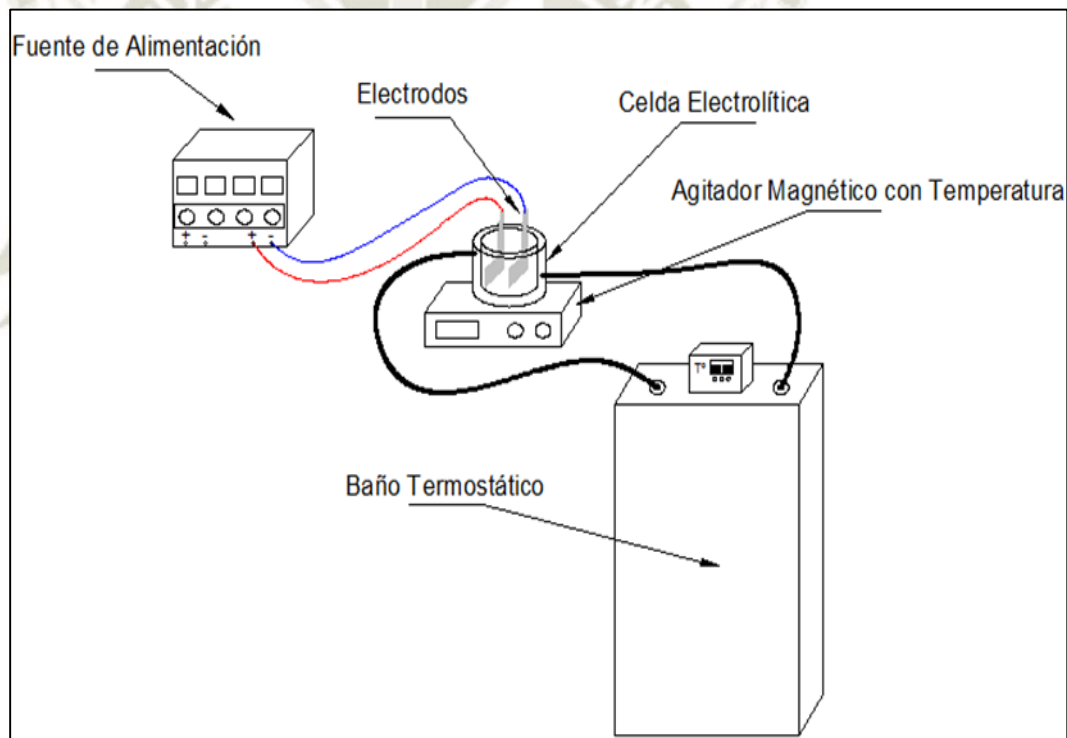


Figura 9. Sistema electroquímico representación AutoCAD

Los sistemas electroquímicos pueden variar en el número de electrodos, material de electrodos, distancia entre un electrodo y otro, sin embargo la mayoría de tipo Batch tienen un agitador magnético y una fuente de alimentación regulable.(64)

Las aguas residuales provenientes de la industria minera, se sometieron a tratamiento electroquímico utilizando la fuente de alimentación regulable y el baño termostático, un agitador magnético y una celda de entradas y salidas, este sistema se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Sistema electroquímico escala laboratorio

3.2.1. Evaluación de la Demanda Química de Oxígeno

Para la evaluación de la DQO se utilizó la técnica de dicromato de potasio medida en el espectrofotómetro antes mencionado.

El método de digestión de dicromato tiene su fundamento en una reacción de oxidación en medio fuertemente ácido y elevada temperatura en la presencia de un catalizador (sulfato de plata). Se utiliza el dicromato de potasio (cromo en la forma Cr^{+6}) debido a su alta capacidad oxidante, facilidad de aplicación y manipulación, además de ser un patrón primario.

La utilización de un catalizador, como es el sulfato de plata, es necesaria para hacer posible una oxidación de compuestos alifáticos de cadena linear. Después de la oxidación de materia orgánica presente, la DQO es obtenida directamente en el espectrofotómetro, a través de una curva patrón hallada en el laboratorio, las muestras se deben leer a 600 nm, para determinar la cantidad de Cr^{+3} (50).

En la Figura 11, se muestra los equipos necesarios para la determinación de DQO, se midió las muestras a una absorbancia de 600 nm.

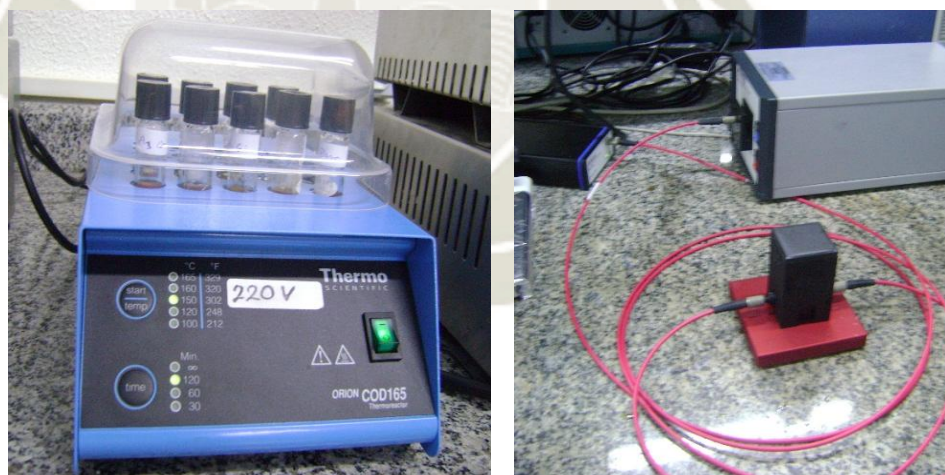


Figura 11. Digestor y espectrofotómetro UV para determinación de DQO

La curva patrón se muestra en la Figura 12, de donde se utilizó el valor de la pendiente de la recta para el posterior análisis de los datos. La ecuación de la recta está representada por la Ecuación 4.

$$y = 0.0003x - 0.0139 \quad \text{Ecuación 4}$$

El valor R^2 fue de 0.9974, como este valor está próximo a la unidad podemos decir que se demuestra la relación entre la concentración y la absorbancia de manera correcta, por mostrar buena linealidad.

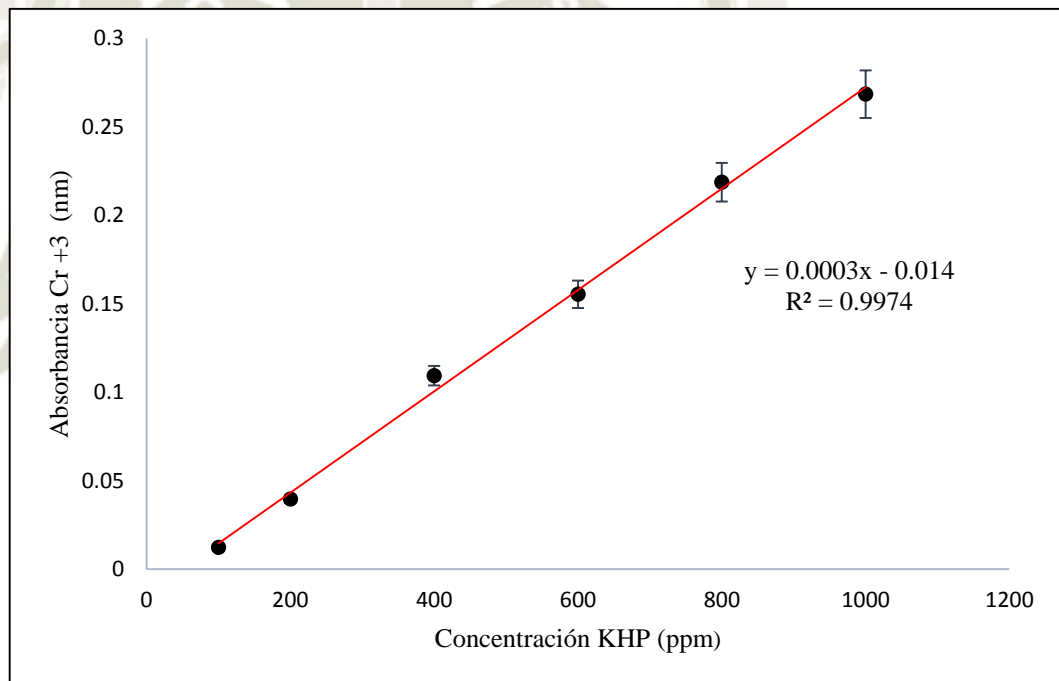


Figura 12. Gráfica de calibración para DQO

Para poder aplicar la ecuación de la recta para nuestras muestras se tiene que y = absorbancia, y x = concentración KHP, por lo que nuestra ecuación quedaría como se muestra a continuación:

$$[]KHP = \frac{Abs (Cr^{+3})+0.0139}{0.0003}$$

Ecuación 5

Una vez obtenida la [] KHP, se aplicará la relación teórica entre el KHP y la DQO

$$1 \text{ mg de KHP} = 1.171 \text{ mg } O_2$$

Ecuación 6

De esta forma se obtuvo la determinación de la DQO, para a continuación medir la absorbancia de las alícuotas tomadas durante el tratamiento electroquímico. Para calcular la eficiencia de remoción en DQO y TOC se utilizó la siguiente fórmula.

$$E(\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Ecuación 7

C_i es la concentración inicial de COT o DQO y C_f es la concentración final.
(65)

En las Figuras 13 y 14 se muestra la relación existente entre el tiempo dado en minutos (eje X) y la eficiencia de remoción de DQO (eje Y) para la muestra A y B respectivamente (Tablas en el anexo 2 y 3).

En la Figura 13 se observa que a partir de los 45 minutos de tratamiento electroquímico, casi la totalidad de ensayos obtuvieron como resultado valores de reducción de DQO mayores al 50 %. La mejor eficiencia de remoción de DQO se presentó a 500 mA a un pH de 6.

En la Figura 14 se observa que a partir de los 45 minutos de tratamiento electroquímico, casi la totalidad de ensayos obtuvieron como resultado valores de reducción de DQO mayores al 50 %. La mejor eficiencia de remoción de DQO se presentó a 500 mA a un pH de 6.

Según Ni'am, Moh et al. (2008), el proceso de electrocoagulación involucra dos pasos, el primero llamado la desestabilización que es usualmente más corto y el segundo la agregación relativamente más largo; el primer paso surge debido a la reacción electroquímica en donde sustancias contaminantes son desestabilizadas para posteriormente en forma de agregados ser eliminadas(66).

En este estudio los iones de aluminio actuaron como desestabilizadores, haciendo que las sustancias contaminantes presentes en las muestras A y B hayan sido desestabilizadas, para posteriormente conformarse en un agregado, de esta manera las muestras A y B que contienen grandes cantidades de materia orgánica por su procedencia; cuando se sometieron a un tratamiento electroquímico el parámetro de medida DQO disminuyó a medida que el tiempo transcurría, siendo el mejor tiempo encontrado a partir de los 45 minutos, a intensidad de corriente de 500 mA y a un pH de 6.

La DQO y el COT se utilizan habitualmente para evaluar el contenido orgánico global de los influentes y determinar la eficiencia de remoción del proceso(67).

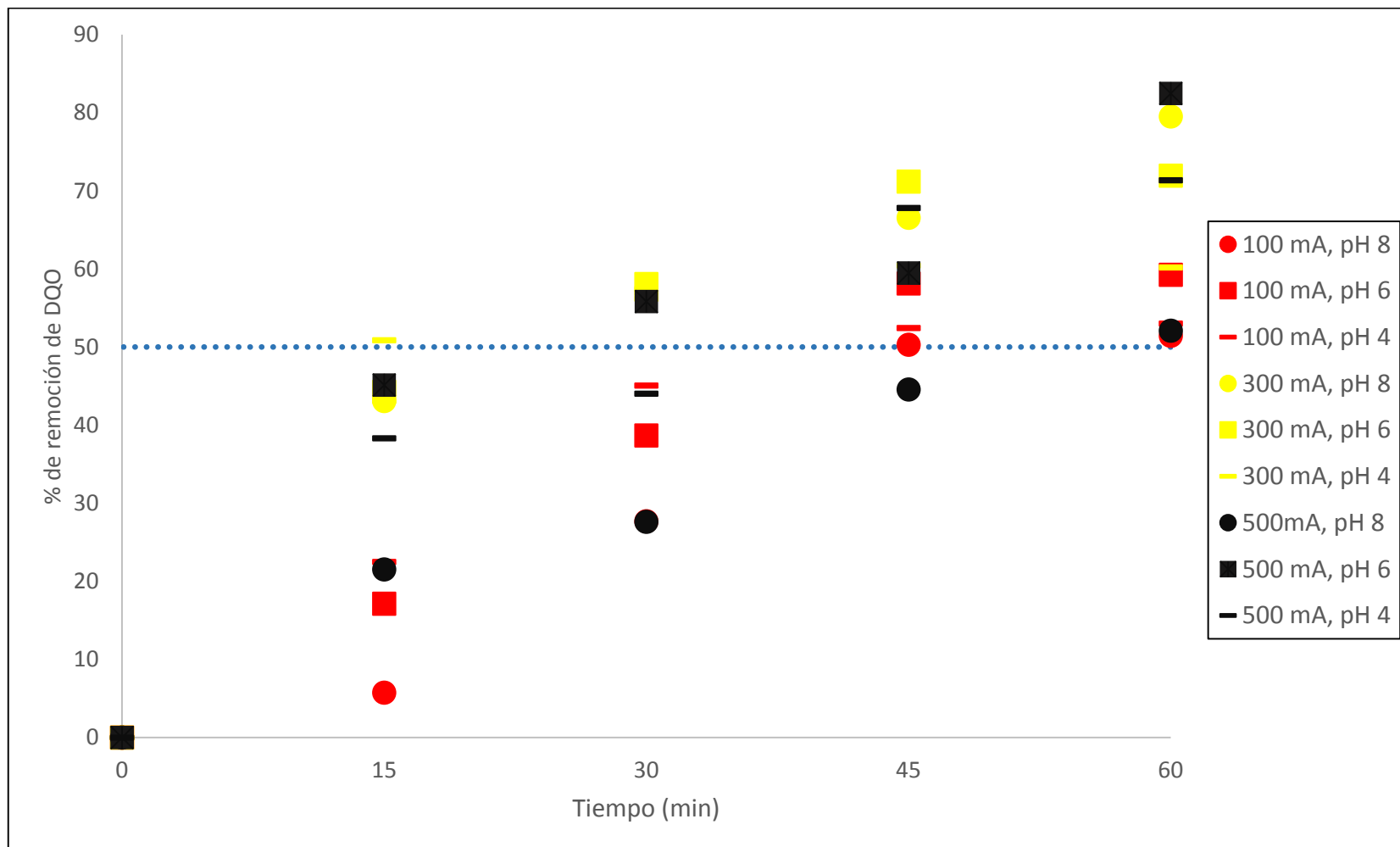


Figura 13. Porcentaje de remoción de DQO con respecto al tiempo, muestra A

Se realizó el análisis estadístico con el software SPSS versión 23.0, donde se comparó el grado de significancia de las muestras A y B. Cuando las muestras indican un $P < 0.05$ son significativas estadísticamente, esto indica que se manejan con un intervalo de confianza de 95% y con un índice de error del 5%

En el Anexo 6 se hace la comparación de las medias del porcentaje de reducción de DQO con respecto a las medias de la intensidad de corriente, pH y tiempo, en la Tabla 8 se muestra la relación con la intensidad de corriente, y se puede inferir que si hay diferencias entre la muestra A y B, sin embargo no son estadísticamente significativas, de la misma forma ocurre en la Tabla 9 donde se hace la comparación en relación al pH. Sin embargo en la Tabla 10, se hace la comparación con el tiempo, y en esta tabla si se puede identificar diferencia estadísticamente significativa en los tiempos de tratamiento tanto en la muestra A como en la muestra B.

En cuanto a la correlación de Pearson, Tabla 11, se demuestra que el tiempo si influye en el porcentaje de reducción, tanto en la muestra A con una correlación positiva de 0.872 y con un P valor < 0.05 , como en la muestra B con una correlación positiva de 0.900 y de la misma manera con un P valor < 0.05 .

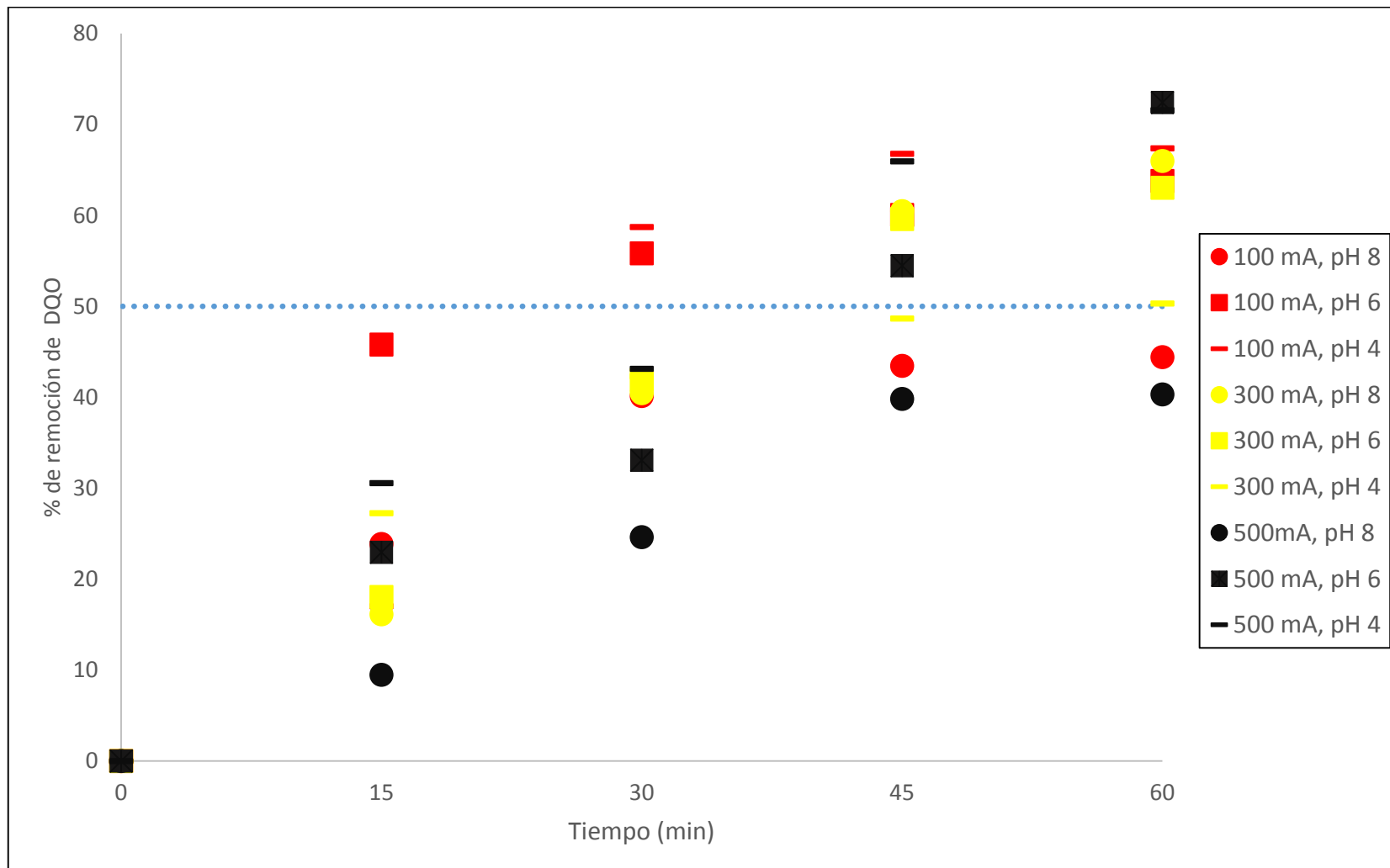


Figura 14. Porcentaje de remoción de DQO con respecto al tiempo, muestra B

3.2.2. Evaluación de Carbono Orgánico Total

El COT se refiere a la cantidad de carbón encontrado en cualquier componente orgánico, en muchos países del mundo la medida de COT es obligatoria.(35) Al efluente tratado también se le realizó la determinación de COT. Los valores de COT fueron medidos en un equipo TOC-L, marca Shimadzu como se puede observar en la Figura 15.



Figura 15. Equipo TOC-L para determinación de COT

En las Figuras 16 y 17 se muestra la relación existente entre el tiempo dado en minutos (eje X) y la eficiencia de remoción de COT (eje Y) para la muestra A y B respectivamente (Tablas en el Anexo 4 y 5) En el caso de COT existe evidencia que a mayor cantidad de amperaje se obtiene un mejor resultado en el porcentaje de reducción de COT, de la misma manera como muestran los resultados de la muestra A y B(68).

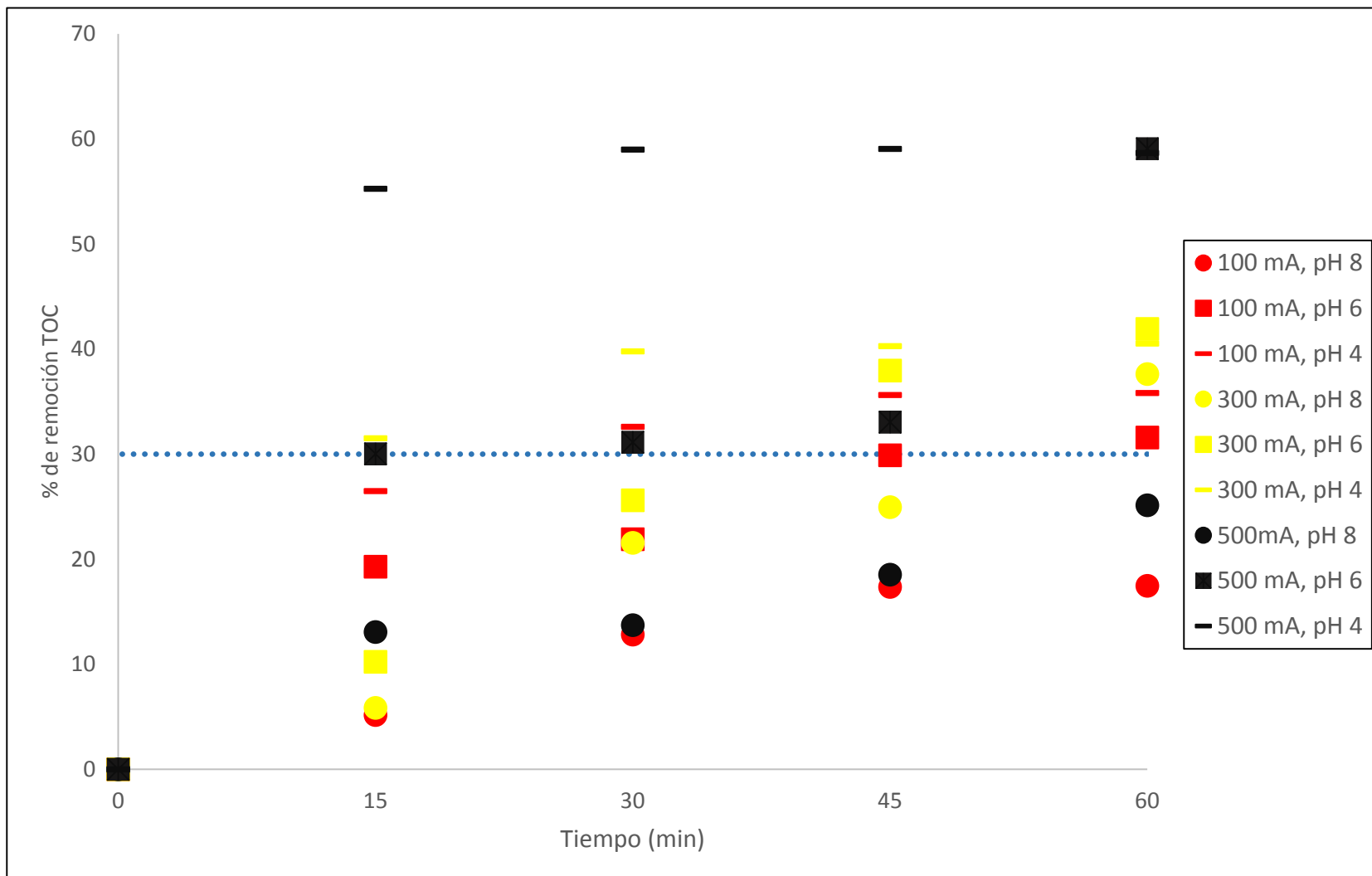


Figura 16. Porcentaje de remoción de COT con respecto al tiempo, muestra A

En la Figura 16 se observa la reducción de COT de la muestra A, donde a partir del minuto 45 más del 50% de las muestras presentan una eficiencia de remoción mayor al 30%, llegando a un porcentaje de reducción del 60% a 500 mA, pH 6.

En la Figura 17 se observa la reducción de COT de la muestra B, donde a partir del minuto 30 más del 50% de las muestras presentan un eficiencia de remoción mayor al 30%, llegando a un porcentaje de reducción del 70% a 500 mA, pH 6.

La concentración de COT es una medida básica para conocer el grado de contaminación orgánica y la pureza del agua, el agua puede contener materia orgánica natural (amina, urea o materia fecal) o sintética (pesticidas, detergentes y fertilizantes sintéticos), estos contaminantes pueden interactuar y causar reacciones, provocar un crecimiento acelerado de los microorganismos, o hacer del agua una sustancia tóxica para seres vivos(35).

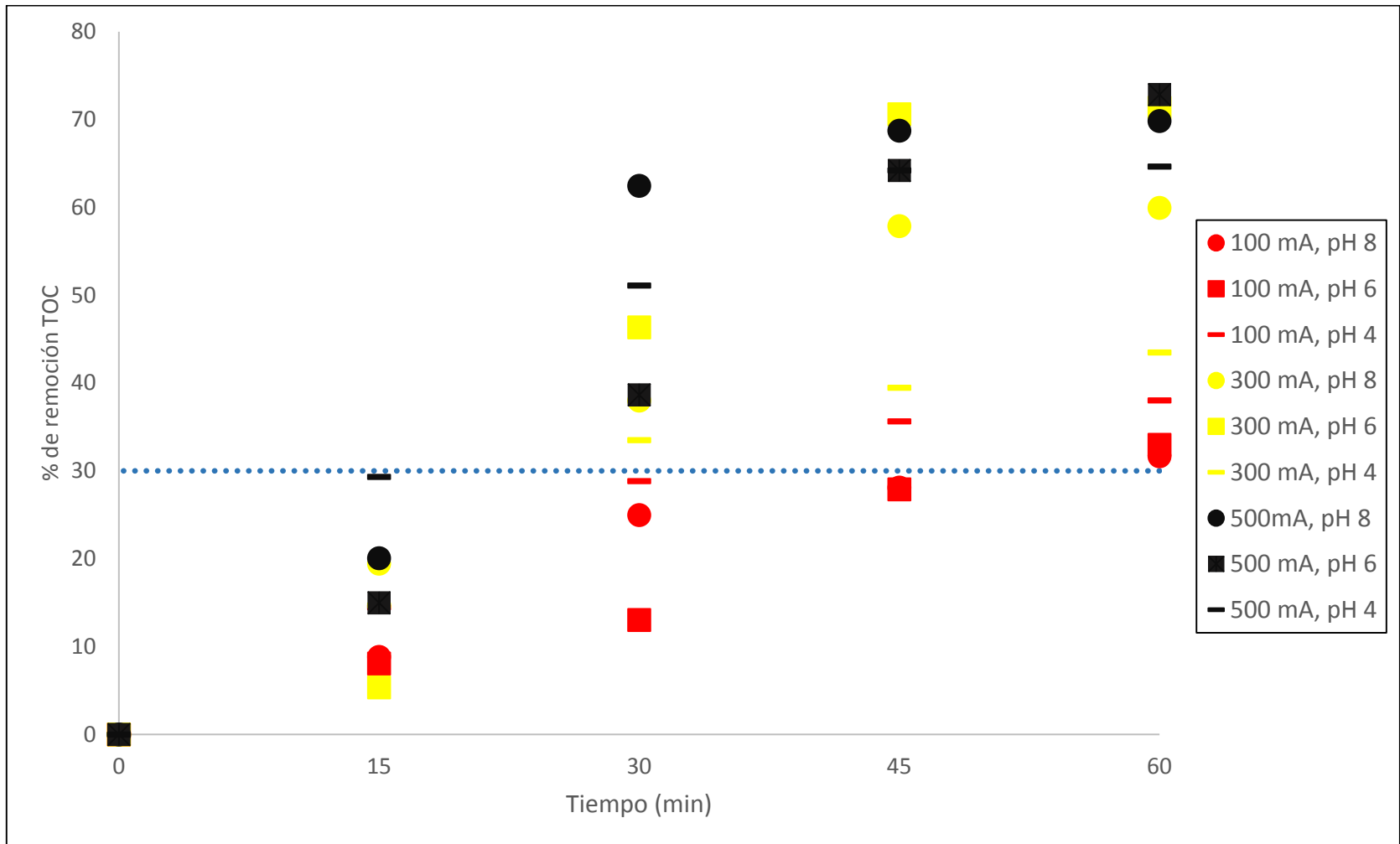


Figura 17. Porcentaje de remoción de COT con respecto al tiempo, muestra B

En el Anexo 7 se hace la comparación de las medias del porcentaje de reducción de COT con respecto a las medias de la intensidad de corriente, pH y tiempo, en la Tabla 12 se muestra la relación con la intensidad de corriente, y se puede inferir que si hay diferencias entre la muestra A y B, la muestra A no es estadísticamente significativa, sin embargo en la muestra B si presenta significancia estadística, en la Tabla 13 se hace la comparación en relación al pH y no existe diferencia estadísticamente significativa. Sin embargo en la Tabla 14, se hace la comparación con el tiempo, y en esta tabla si se puede identificar diferencia estadísticamente significativa en los tiempos de tratamiento tanto en la muestra A como en la muestra B.

En cuanto a la correlación de Pearson, Tabla 15, se demuestra que el tiempo si influye en el porcentaje de reducción, tanto en la muestra A con una correlación positiva de 0.765 y con un P valor < 0.05 , como en la muestra B con una correlación positiva de 0.835 y de la misma manera con un P valor < 0.05 .

3.2.3. Análisis de electrodos por Microscopia Electrónica de Barrido

Las Figuras 18 y 19 muestran la morfología de los cátodos luego de ser sometidos a tratamiento electroquímico la presencia de la superficie de la mayoría amorfa, y estructura particular ultrafina de tamaño micrométrico. La superficie del aluminio es recubierta por una delgada capa formada al contacto con el aire, esta protege el aluminio de la corrosión(69).

En la Figura 18, se puede observar las micrografías obtenidas en el microscopio electrónico de barrido de la muestra A, en las micrografías (A) y (B) indican el tratamiento electroquímico de 100 mA a pH 6, a un aumento de 500 y 1000x respectivamente, se puede ver acumulaciones de partículas de 1 μm de tamaño aproximadamente, también se puede observar abolladuras de 10 μm aproximadamente.

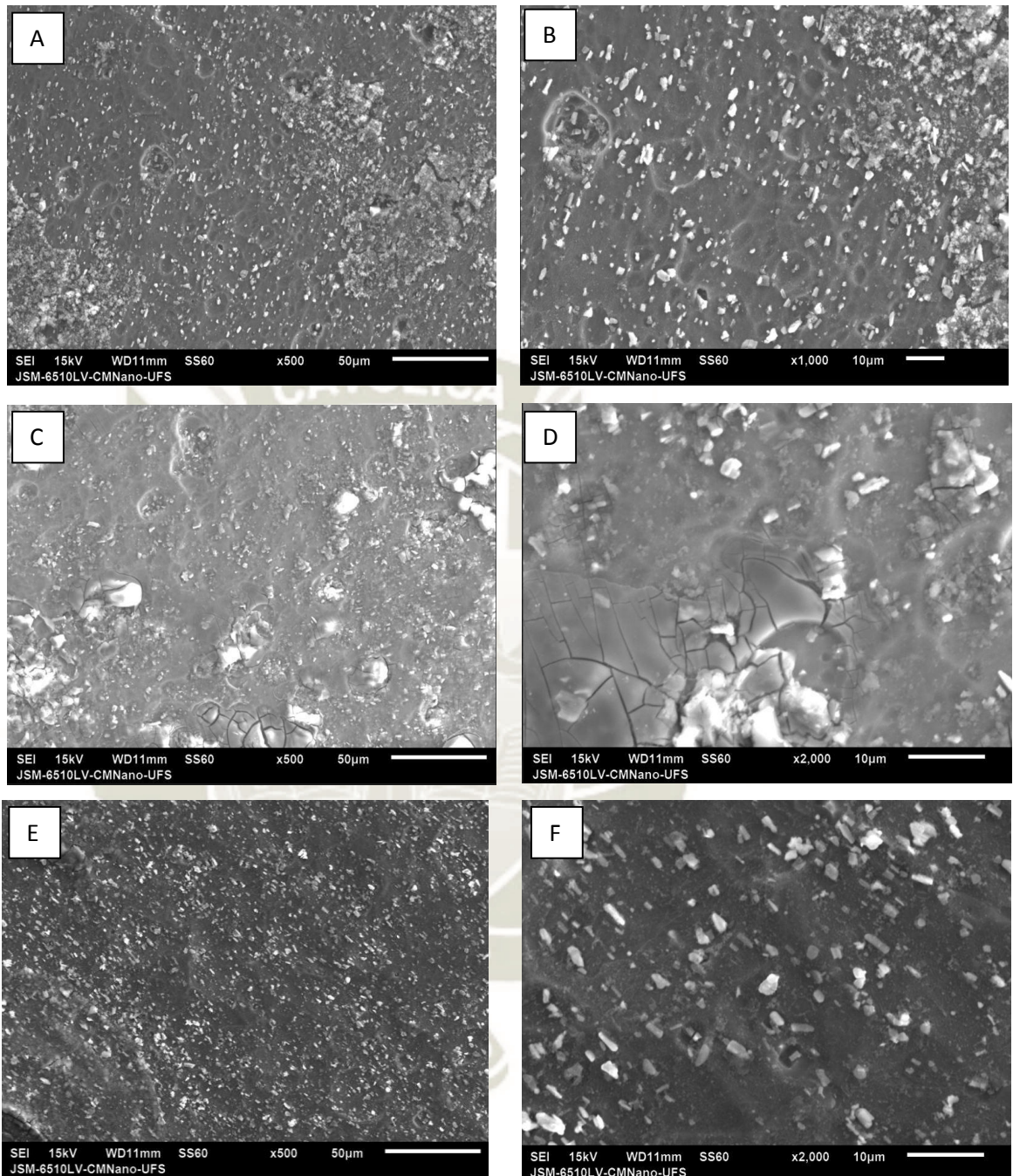


Figura 18. Muestra A, MEB del electrodo (A) 100 mA, pH 6, 500x; (B) 100 mA, pH 6, 1000x; (C) 300 mA, pH 8, 500 x; (D) 300 mA, pH 8, 2000x; (E) 500 mA, pH 6, 500x; (F) 500 mA, pH 6, 2000x

En las micrografías (C) y (D) indican el tratamiento electroquímico de 300 mA a pH 8, a un aumento de 500 y 2000x respectivamente, se ven acumulaciones de partículas de 3 μm aproximadamente, a diferencia de la micrografía de 100 mA, en la micrografía de 300 mA se puede observar una formación de una capa compacta con rajaduras delgadas, a la vez se observan abolladuras de forma ovalada de 10 μm aproximadamente. En las micrografías (E) y (F) indican el tratamiento electroquímico de 500 mA a pH 6, a un aumento de 500 y 2000x respectivamente, existe mayor cantidad de partículas sólidas adheridas a diferencia de 100 mA y 300 mA, que son de un tamaño de 3 μm aproximadamente, además se ven mayor cantidad de abolladuras de 10 μm aproximadamente.

En la Figura 19, se puede observar las micrografías obtenidas en el microscopio electrónico de barrido de la muestra B, en las micrografías (A) y (B) indican el tratamiento electroquímico de 100 mA a pH 4, a un aumento de 500 y 1000x respectivamente, se puede ver una gran cantidad de acumulaciones de partículas porosas, en esta vista al microscopio electrónico se ve que toda la región está cubierta sin poder diferenciar el tamaño de las partículas, también se puede observar abolladuras de 10 μm aproximadamente. En las micrografías (C) y (D) indican el tratamiento electroquímico de 300 mA a pH 8, a un aumento de 500 y 1000x respectivamente, se ven acumulaciones de partículas de 3 μm aproximadamente, se puede observar la formación de capas compactas con rajaduras delgadas, a la vez se observan abolladuras de forma ovalada de 10 μm aproximadamente. En las micrografías (E) y (F) indican el tratamiento electroquímico de 500 mA a pH 6, a un aumento de 500 y 2000x respectivamente, se observa una capa porosa y compacta con rajaduras en toda la región enfocada.

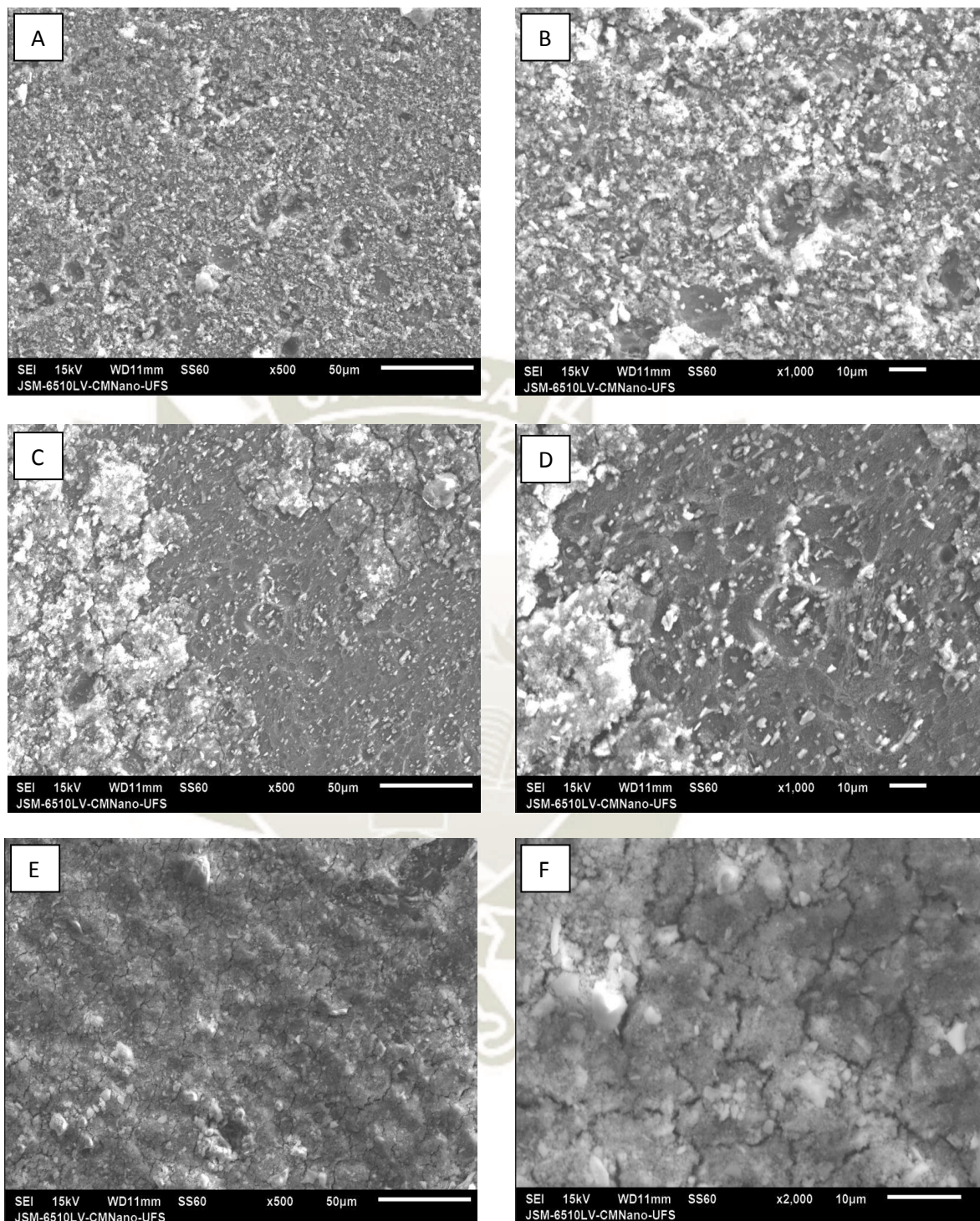
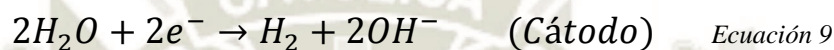
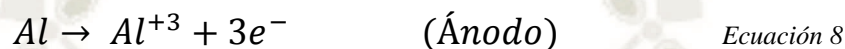


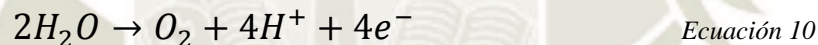
Figura 19. Muestra B, MEB del electrodo (A) 100 mA, pH 4, 500x; (B) 100 mA, pH 4, 1000x; (C) 300 mA, pH 8, 500 x; (D) 300 mA, pH 8, 1000x; (E) 500 mA, pH 6, 500x; (F) 500 mA, pH 6, 2000x

3.2.4. Análisis de electrodos por Difractometría de Rayos X

El aluminio, material del cual son los electrodos sufre una serie de reacciones como se muestra a continuación. (70)



Cuando el potencial del ánodo es suficientemente alto pueden ocurrir algunas reacciones secundarias.



Las Figuras 20 y 21 muestran los difractogramas, luego del tratamiento electroquímico.

En la Figura 20, se observa el difractograma de la muestra A luego de ser sometida al tratamiento electroquímico, (A) a 100 mA y (B) a 500 mA, donde se evidencia la presencia de aluminio, como se mencionó antes es el material del cual están hechos los electrodos, no se evidencia la presencia de algún otro compuesto.

En la Figura 21, se observa el difractograma de la muestra B luego de ser sometida al tratamiento electroquímico, (A) a 100 mA donde se evidencia la presencia de aluminio que es el material del cual están hechos los electrodos y no se evidencia la presencia de algún otro compuesto, (B) y (C) a 300 y 500

mA se evidencia la presencia de aluminio que es el material del cual están hechos los electrodos, además existe un pico que se identifica como HgO_2 , la naturaleza del agua residual tratada es de minería aurífera artesanal, donde se utiliza el mercurio para la extracción de oro. Otros picos no identificados se deben a la presencia de ruido.

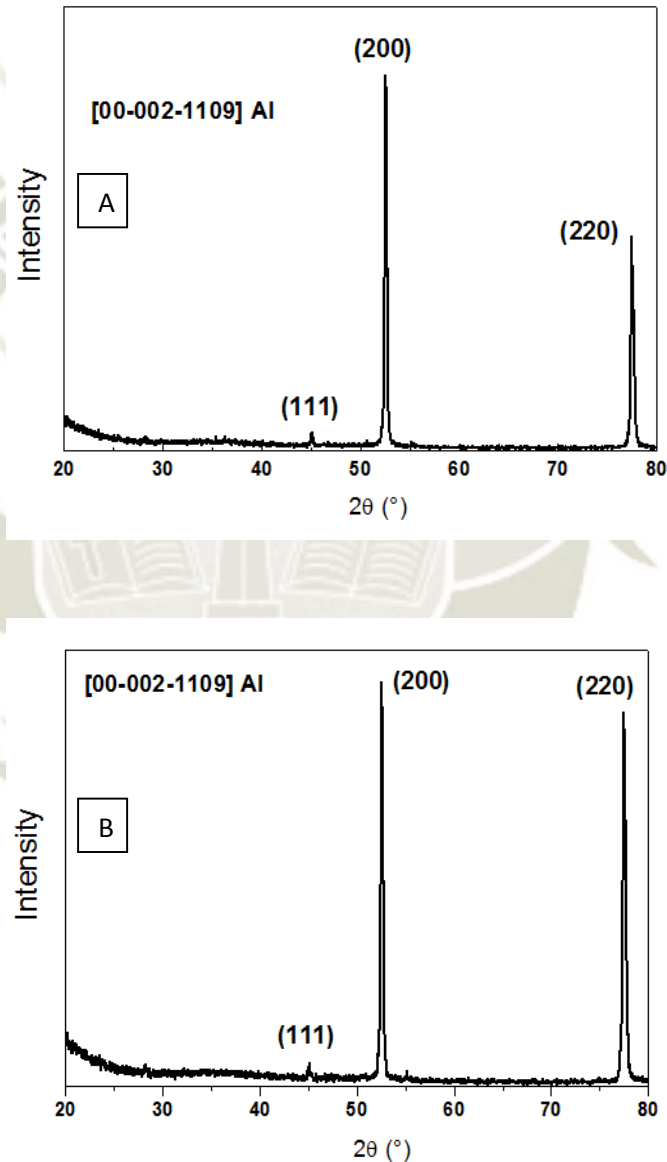


Figura 20. DRX muestra A, (A) 100 mA, (B) 500 mA

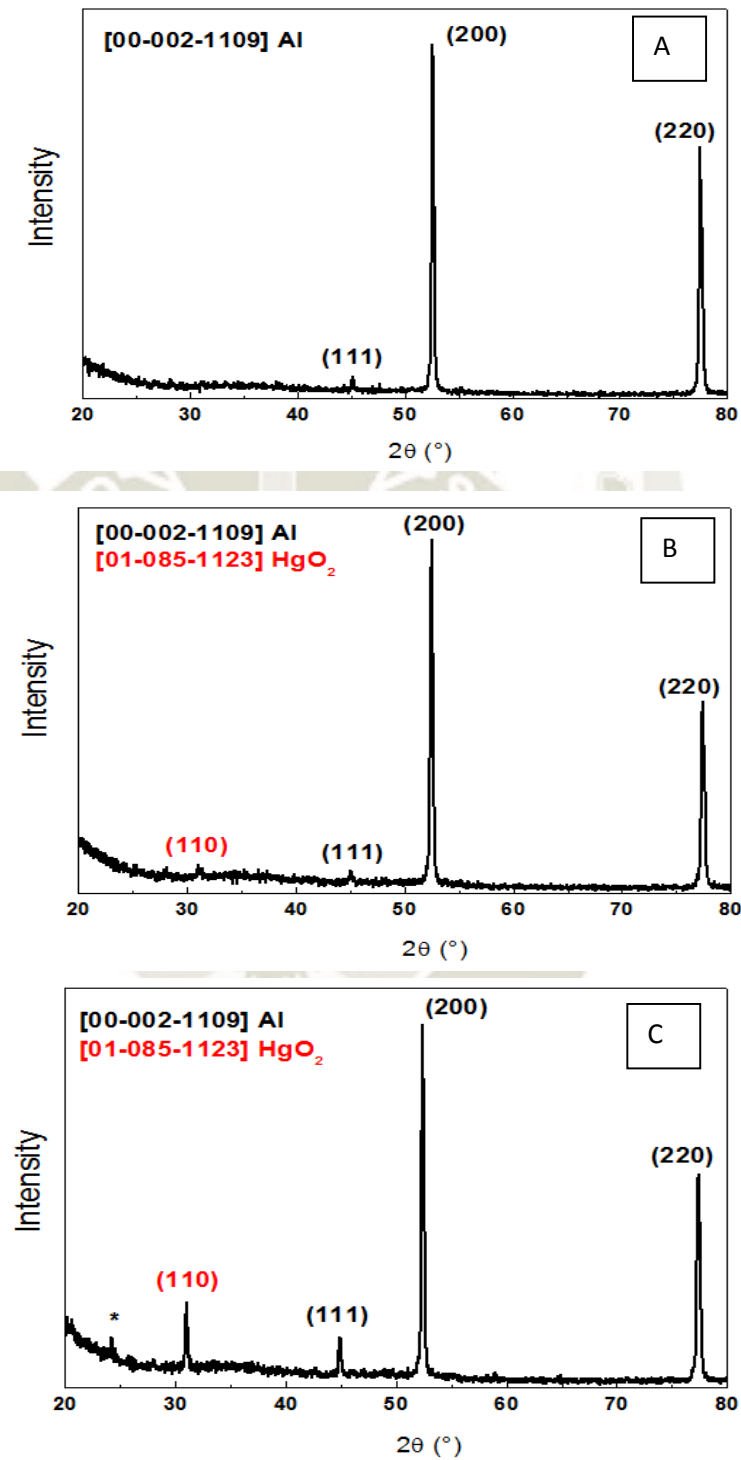


Figura 21. DRX muestra B, (A) 100 mA, (B) 300 mA, (C) 500 mA

3.3. Evaluación del crecimiento del hongo *Pleurotus sajor caju*

La Figura 22 muestra la concentración del efluente 5, 10, 25, 50 y 100% antes de ser autoclavado para luego ser colocado en placas Petri. Este procedimiento se realizó para las muestras A y B.

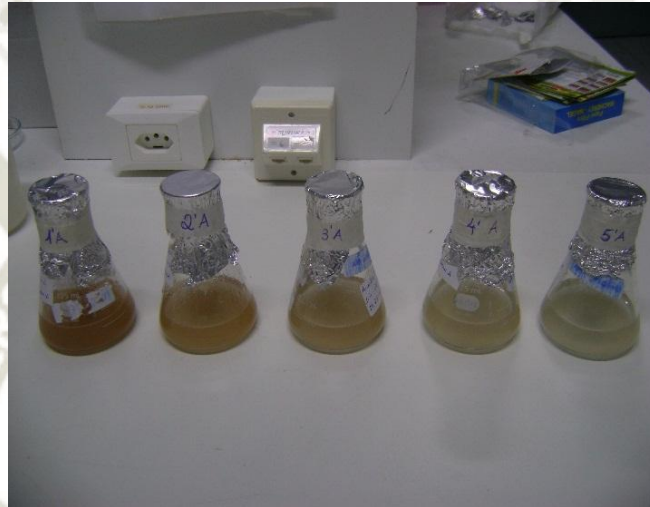


Figura 22. Dilución de efluente; 5, 10, 25, 50 y 100%

La Figura 23 muestra la siembra del hongo *Pleurotus sajor caju* en placas Petri, cada una de las concentraciones fue distribuida en tres placas Petri y a cada una de ellas se añadió 1 cm² del hongo.



Figura 23. Dilución de efluente en placa Petri; 5, 10, 25, 50 y 100%

Una vez realizada la siembra del hongo en las placas Petri, se procedió a realizar la medición del halo de crecimiento durante el día 1, 3, 5 y 7, posteriormente se realizó un promedio de crecimiento en centímetros.

Los hongos de pudrición blanca como es el caso de *Pleurotus sajor caju*, son capaces de biodegradar la lignina, la mayoría de efluentes con color marrón se originan principalmente por la presencia de lignina. Las principales enzimas involucradas en la degradación de la lignina son la peroxidasa de lignina, la peroxidasa de manganeso, la peroxidasa versátil y la lacasa, producidas por el género *Pleurotus*(71)(72). Nuestro efluente es perteneciente al grupo Yura, existe evidencia de la presencia de material orgánico terrestre y material algal orgánico, además de fósiles de material vegetal (55), de esta manera se justifica la presencia de lignina en el efluente y a la vez la eficiencia del hongo *Pleurotus sajor caju* en su tratamiento.

En la Figura 24 se muestra el crecimiento del halo del hongo en centímetros a diferentes concentraciones del efluente de la muestra A y B, para la muestra A el mayor crecimiento del hongo se da a concentración de 25%, presentando un promedio de 1.86 ± 0.05 cm, de la misma manera en la muestra B el resultado de mayor crecimiento se observa a una dilución de 25% con una medida de 1.72 ± 0.17 cm.

A partir de estos resultados, la dilución que mayor crecimiento de hongo presentaba en ambos casos fue la de 25%.

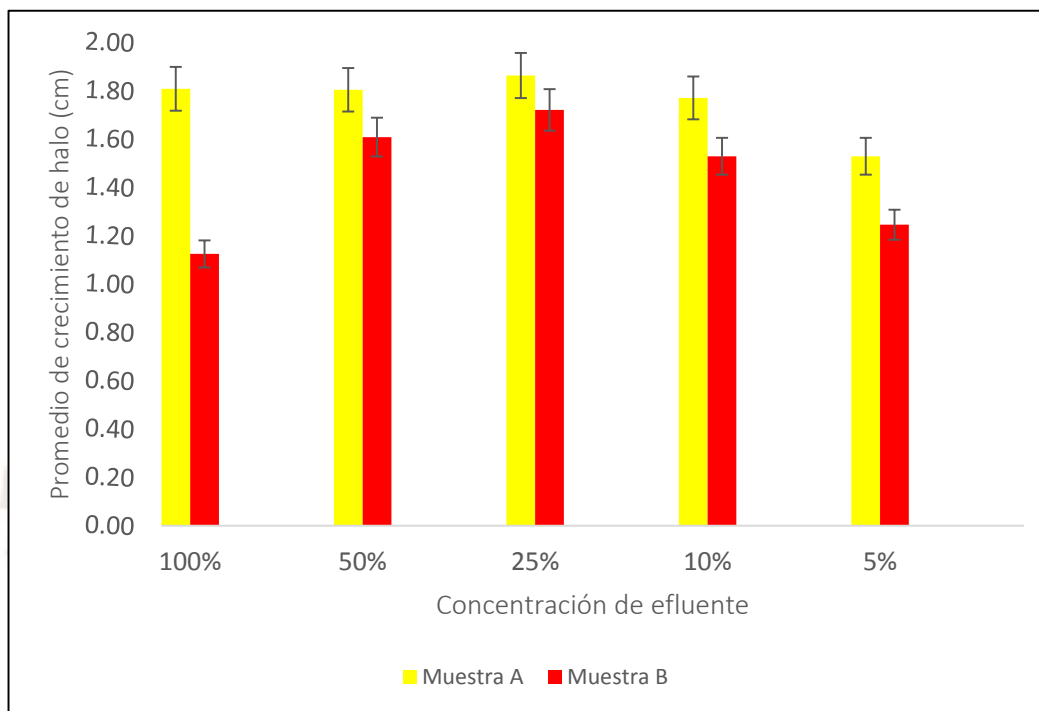


Figura 24. Concentración del efluente con respecto al crecimiento del hongo, muestra A y B

A partir de este resultado se inoculó el hongo en un Erlenmeyer a dilución de 25% durante siete días, obteniéndose para la muestra A una eficiencia de remoción de DQO de 42.04% y 37.7%, y de COT de 22.4% y 26.2%, para las muestras A y B en ambos casos respectivamente.

3.4. Evaluación del sistema electroquímico y biológico

El sistema electroquímico y biológico muestra el desarrollo de un sistema secuencial de un sistema electroquímico y un sistema biológico. Se utilizó el mejor resultado en cuanto a eficiencia de remoción de DQO y COT, el mejor resultado en ambas muestras fue a 500 mA a un pH de 6, a este tratamiento se inoculó el hongo *Pleurotus sajor caju*.

La Figura 25 muestra gráficamente la eficiencia de remoción de DQO y COT para ambas muestras luego de 384 horas de inoculación. La eficiencia de remoción de DQO en la muestra A muestra que a un tiempo aproximado de 20 h el hongo empieza a actuar, hasta un tiempo de 250 h, de ahí en adelante la eficiencia de remoción comienza a ser constante, se llega a un DQO de 99 mg O²/l. La eficiencia de remoción de DQO en la muestra B muestra que a un tiempo aproximado de 24 h el hongo empieza a actuar, hasta un tiempo de 300 h, de ahí en adelante la eficiencia de remoción comienza a ser constante, se llega a un DQO de 167 mg O²/l. La eficiencia de remoción de COT en la muestra A muestra que a un tiempo aproximado de 20 h el hongo empieza a actuar, hasta un tiempo de 300 h, de ahí en adelante la eficiencia de remoción comienza a ser constante. La eficiencia de remoción de COT en la muestra B muestra que a un tiempo aproximado de 24 h el hongo empieza a actuar, hasta un tiempo de 192 h, de ahí en adelante la eficiencia de remoción comienza a ser constante. En las muestras A y B se llega a un valor aproximado de 10. (Anexo 10)

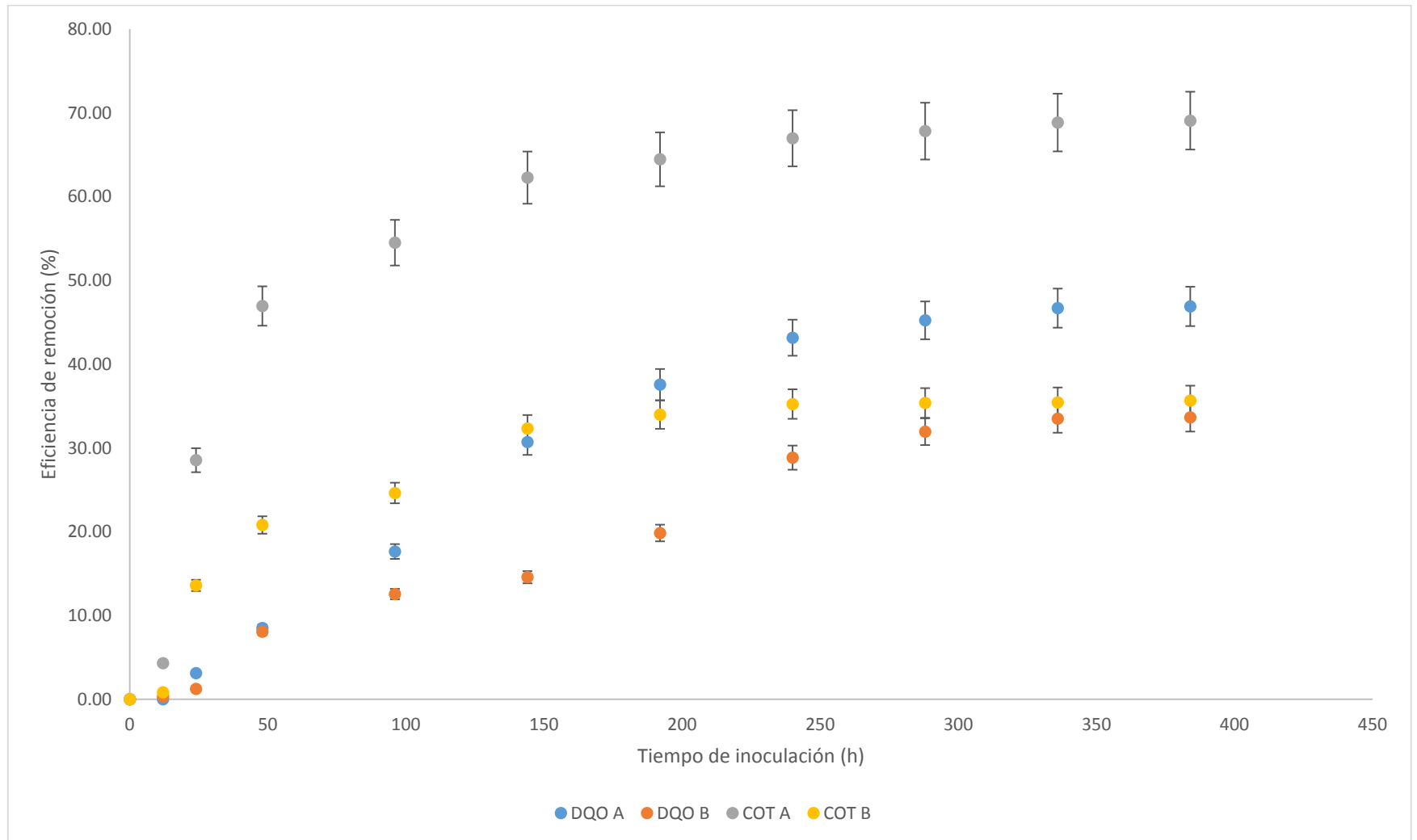


Figura 25. Eficiencia de remoción DQO y COT de las muestras A y B

En la Figura 26 se muestra el diagrama para la obtención de los diferentes valores de la DQO y COT en las diferentes etapas del proceso.

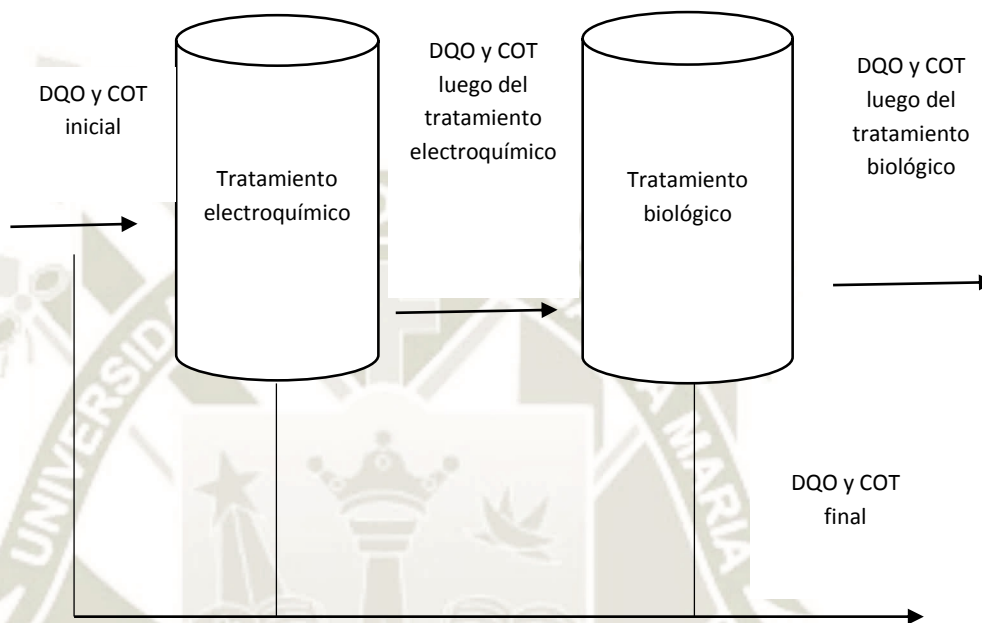


Figura 26. Esquema del proceso de obtención de DQO y COT

En el Anexo 11, Tabla 22, se puede observar el porcentaje de reducción de DQO y COT para la muestra A, en el tratamiento secuencial electroquímico y biológico. Una vez realizado el tratamiento electroquímico, se determinó que el tratamiento con más eficiencia de remoción de DQO y COT fue 500 mA a pH 6, se incubó el hongo *Pleurotus sajor caju* y se volvió a tomar parámetros de DQO y COT. Se tuvo un DQO inicial de 1068 mg O²/L, luego de 60 minutos de tratamiento electroquímico llegó a 187 mg O²/L, posteriormente se aplicó el tratamiento biológico y luego de 384 h de incubación del hongo se llegó a 99.9 mg O²/L, teniendo una eficacia de remoción total de 90.65%. Asimismo, se tuvo un COT inicial de 87.96, luego de 60 minutos de tratamiento electroquímico llegó a 36,

posteriormente se aplicó el tratamiento biológico y luego de 384 h de incubación del hongo se llegó a 11.2, teniendo una eficacia de remoción total de 87.27%.

De igual forma en el Anexo 11, Tabla 23, se puede observar el porcentaje de reducción de DQO y COT para la muestra B, en el tratamiento secuencial electroquímico y biológico. Una vez realizado el tratamiento electroquímico, se determinó que el tratamiento con más eficiencia de remoción de DQO y COT fue 500 mA a pH 6, se incubó el hongo *Pleurotus sajor caju* y se volvió a tomar parámetros de DQO y COT. Se tuvo un DQO inicial de 911 mg O²/L, luego de 60 minutos de tratamiento electroquímico llegó a 251 mg O²/L, posteriormente se aplicó el tratamiento biológico y luego de 384 h de incubación del hongo se llegó a 167.06 mg O²/L, teniendo una eficacia de remoción total de 81.66%. Asimismo, se tuvo un COT inicial de 53.00, luego de 60 minutos de tratamiento electroquímico llegó a 14.40, posteriormente se aplicó el tratamiento biológico y luego de 384 h de incubación del hongo se llegó a 9.28, teniendo una eficacia de remoción total de 82.49%.

3.4.1. Bioensayo de ecotoxicidad

Lactuca sativa es una especie de planta modelo empleada en pruebas de fitotoxicidad y ha sido recomendado por muchas organizaciones internacionales para la determinación de los efectos ecológicos de las sustancias tóxicas y para las pruebas de toxicidad estándar (ISO, 1995; USEPA, 1996; OCDE, 2003). Las pruebas de fitotoxicidad con *L. sativa* son simples, rápidas, confiables, económicas y no requieren equipo costoso. La prueba de germinación de semillas y alargamiento de raíces es uno de los métodos más simples de fitotoxicidad porque la semilla germinante es la primera interfaz de intercambio de material entre la planta en desarrollo y el medio ambiente(73, 74).

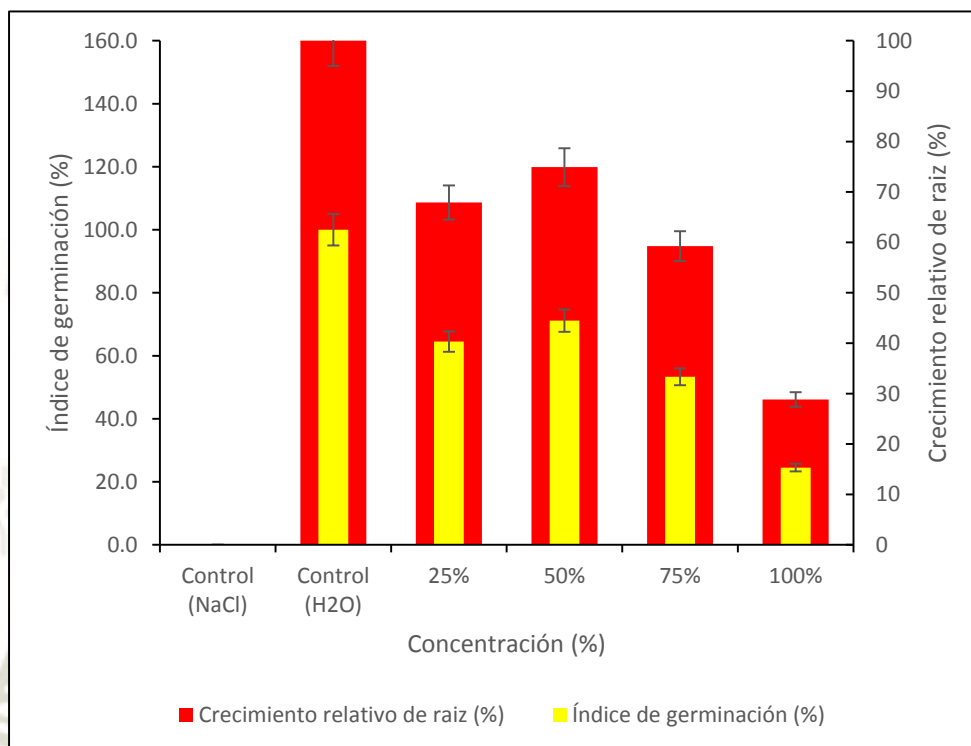


Figura 27. Índice de germinación y crecimiento relativo de la raíz con respecto a la concentración de muestra A

En la Figura 27 se muestra el índice de germinación y el crecimiento relativo de la raíz para la muestra A, los mejores resultados se observan a un 50 % de concentración, un 74.9% de crecimiento relativo de la raíz y 71.2% de índice de germinación.

En la Figura 28 se muestra el índice de germinación y el crecimiento relativo de la raíz para la muestra B, los mejores resultados se observan a un 50 % de concentración, un 98.3% de crecimiento relativo de la raíz y 88.5% de índice de germinación.

En el caso de las semillas sembradas con NaCl, ninguna de ellas germinó, debido a que los iones cloruro puede considerarse como inhibidor de crecimiento de la raíz.

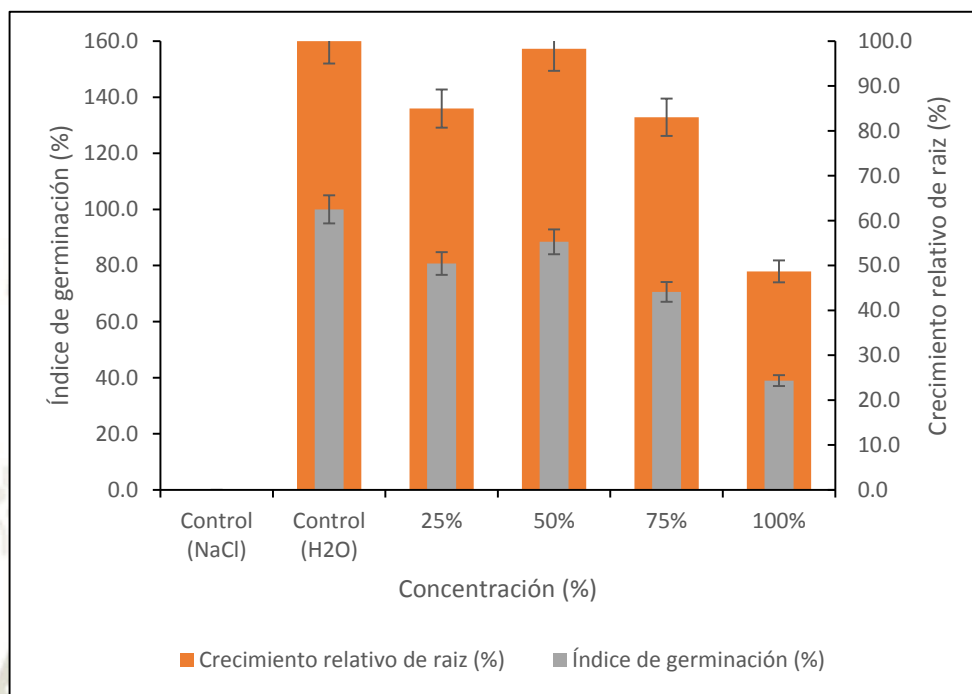


Figura 28. Índice de germinación y crecimiento relativo de la raíz con respecto a la concentración de muestra B

Según Cesaro y col. (2015), analizando la fitotoxicidad de los residuos sólidos orgánicos, usando semillas de *L. sativa*, todos los resultados para índice de germinación por debajo del 40% indican sensibilidad a la inhibición de semillas, de 40 al 80% indican una ligera inhibición, los valores del 80 al 120% no se consideran significativos y los valores por encima del 120% se consideran estímulos de crecimiento(75).

Al estar los mejores resultados presentes en la concentración 50%, presentando un índice de germinación de 74.9 y 88.5% en la muestra A y en la muestra B respectivamente, se puede decir que no existe una influencia significativa en la germinación de las semillas, este ensayo sirve como un indicador de la toxicidad, se deduce que nuestras muestras con el tratamiento

bioelectroquímico secuencial, resultarían inocuas para una propuesta de crecimiento de este tipo de semillas.





CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

4. CONCLUSIONES

PRIMERA: Se logró diseñar un equipo Batch a escala laboratorio con temperatura y presión constante, donde se utilizó electrodos de aluminio y se estableció los parámetros de tratamiento pH, tiempo de tratamiento electroquímico e intensidad de corriente.

SEGUNDA: Se evaluó morfológicamente las micrografías de los electrodos luego de ser utilizados para el tratamiento electroquímico de las aguas residuales de la industria minera aurífera, además se obtuvo la composición de estos electrodos mediante Difractometría de Rayos X.

TERCERA: Se determinó la mejor concentración del agua residual industrial proveniente de la industria minera aurífera para el crecimiento del hongo de pudrición blanca *Pleurotus sajor caju*.

CUARTA: Se logró obtener la reducción de la Demanda Química de Oxígeno y del Carbono Orgánico total en el tratamiento electroquímico y también en el tratamiento biológico.

QUINTA: Se estableció el bioensayo de ecotoxicidad para evaluar la calidad del agua residual industrial minera tratada electroquímica y biológicamente, en ambas muestras A y B existe crecimiento de *Lactuca sativa* con resultados aceptables de índice de germinación y crecimiento de la raíz, lo cual sugiere que el agua residual tratada sería útil para este tipo de plantación.

SEXTA: Se desarrolló un sistema electroquímico y biológico secuencial en aguas residuales industriales mineras auríferas que lograron la disminución de la carga orgánica y carbono orgánico total de la solución.



REFERENCIAS

1. Galarza E, Alegre M, Merzthal G, Sarmiento L, Melendez M, Loyola J, et al. APRENDE A PREVENIR LOS EFECTOS DEL MERCURIO. Minam. 2016.
2. Smith NM. “Our gold is dirty, but we want to improve”: Challenges to addressing mercury use in artisanal and small-scale gold mining in Peru. Journal of Cleaner Production. 2019;222:646-54.
3. Medina G. ESTUDIO DE INVESTIGACIÓN DE LA MINERÍA ILEGAL EN EL PERÚ. Encuentro Empresarial: XXVII Convención Minera. 2007.
4. Monteagudo F. Evaluación de la Contaminación por Mercurio en población de mineros artesanales de oro de la comunidad de Santa Filomena – Ayacucho – Perú. Durante el periodo agosto 2000 – setiembre 2001: Universidad Mayor de San Marcos; 2001.
5. Yin R, Feng X, Wang J, Bao Z, Yu B, Chen J. Mercury isotope variations between bioavailable mercury fractions and total mercury in mercury contaminated soil in Wanshan Mercury Mine, SW China. Chemical Geology. 2013;336:80-6.
6. Reis AT, Rodrigues SM, Davidson CM, Pereira E, Duarte AC. Extractability and mobility of mercury from agricultural soils surrounding industrial and mining contaminated areas. Chemosphere. 2010;81(11):1369-77.
7. Issaro N, Abi-Ghanem C, Bermond A. Fractionation studies of mercury in soils and sediments: a review of the chemical reagents used for mercury extraction. Anal Chim Acta. 2009;631(1):1-12.
8. Rajae M, Obiri S, Green A, Long R, Cobbina SJ, Nartey V, et al. Integrated Assessment of Artisanal and Small-Scale Gold Mining in Ghana-Part 2: Natural Sciences Review. Int J Environ Res Public Health. 2015;12(8):8971-9011.
9. Beckers F, Rinklebe J. Cycling of mercury in the environment: Sources, fate, and human health implications: A review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2017;47(9):693-794.

10. Echols KR, Meadows JC, Orazio CE. Pollution of Aquatic Ecosystems II: Hydrocarbons, Synthetic Organics, Radionuclides, Heavy Metals, Acids, and Thermal Pollution. In: Likens GE, editor. Encyclopedia of Inland Waters. Oxford: Academic Press; 2009. p. 120-8.
11. Almuktar S, Abed SN, Scholz M. Wetlands for wastewater treatment and subsequent recycling of treated effluent: a review. Environ Sci Pollut Res Int. 2018;25(24):23595-623.
12. Guimarãesa J, Souza A, Brigida A, Furtado A, Chicrala P, Santos V, et al. Quantification and characterization of effluents from the seafood processing industry aiming at water reuse: A pilot study. Water Process Engineering. 2018;26:138-45.
13. OEFA. Fiscalización ambiental en aguas residuales 2014.
14. Valdivia SM, Ugaya CML. Life Cycle Inventories of Gold Artisanal and Small-Scale Mining Activities in Peru. Journal of Industrial Ecology. 2011;15(6):922-36.
15. Bustamante N, Danoucaras N, McIntyre N, Díaz-Martínez JC, Restrepo-Baena OJ. Review of improving the water management for the informal gold mining in Colombia. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. 2016(79).
16. Diaz B. CE. Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales. Reverté E, editor 2014.
17. Yris Martinez RH. Electroquímica, Energía y Ambiente. Andes UdL, editor 2005.
18. Arango Ruiz A. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista Lasallista de Investigación. 2005;2(1):49-56.
19. Jüttner K, Galla U, Schmieder H. Electrochemical approaches to environmental problems in the process industry. Electrochimica Acta. 2000;45(15):2575-94.
20. Mamelkina MA, Vasilyev F, Tuunila R, Sillanpää M, Häkkinen A. Investigation of the parameters affecting the treatment of mining waters by electrocoagulation. Journal of Water Process Engineering. 2019;32:100929.
21. Li Q, Jensen JO, Bjerrum NJ. CHEMISTRY, ELECTROCHEMISTRY, AND ELECTROCHEMICAL APPLICATIONS | Aluminum. In: Garcke J, editor. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources. Amsterdam: Elsevier; 2009. p. 695-708.

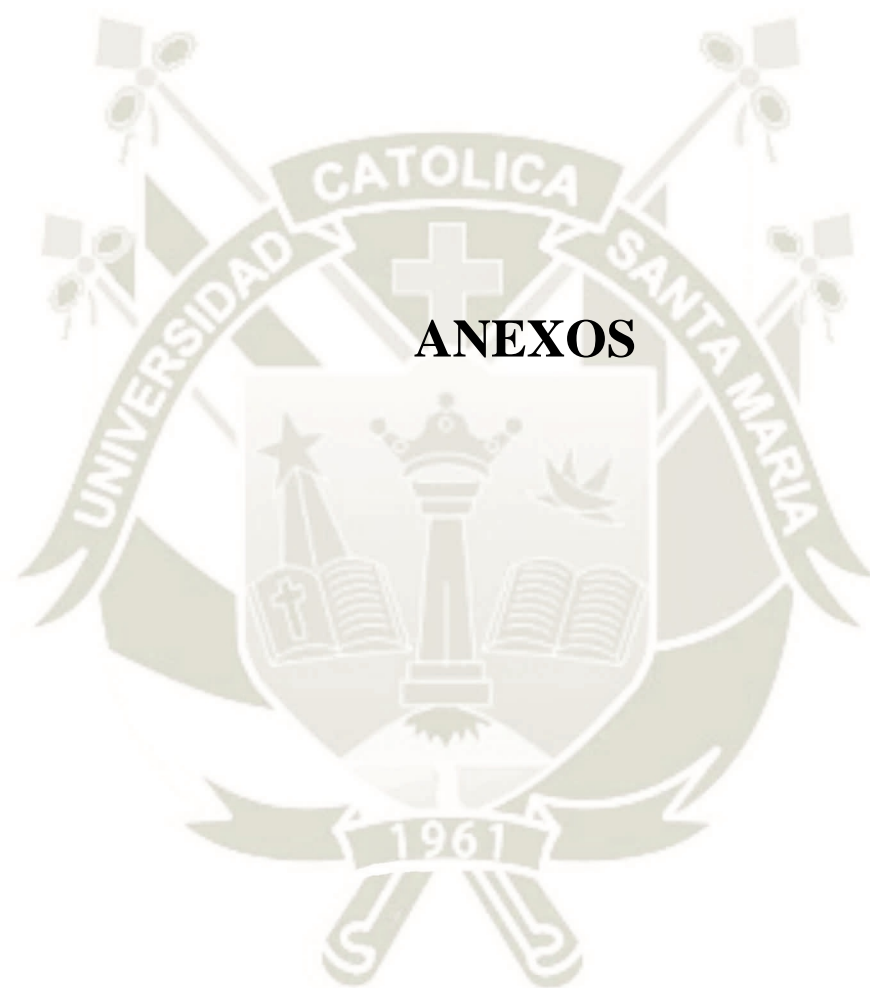
22. Mollah MYA, Schennach R, Parga JR, Cocke DL. Electrocoagulation (EC) — science and applications. *Journal of Hazardous Materials*. 2001;84(1):29-41.
23. Shafaei A, Rezayee M, Arami M, Nikazar M. Removal of Mn²⁺ ions from synthetic wastewater by electrocoagulation process. *Desalination*. 2010;260(1-3):23-8.
24. Ratna Kumar P, Chaudhari S, Khilar KC, Mahajan SP. Removal of arsenic from water by electrocoagulation. *Chemosphere*. 2004;55(9):1245-52.
25. Sillanpää M, Shestakova M. *Electrochemical Water Treatment Methods*. 2017:47-130.
26. Cheng KY, Karthikeyan R, Wong JWC. Chapter 4.2 - Microbial Electrochemical Remediation of Organic Contaminants: Possibilities and Perspective. In: Mohan SV, Varjani S, Pandey A, editors. *Microbial Electrochemical Technology*: Elsevier; 2019. p. 613-40.
27. Landy Irene Ramírez-Burgos MdCD-D-d-B, Juan Alejandro García-Fernández , Ramón Montuy-Hernández, Miguel Oaxaca-Grande DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO DE MUESTRAS ACUOSAS Química Ambiental de los Residuos Peligrosos 2008;1.
28. Walker DB, Baumgartner DJ, Gerba CP, Fitzsimmons K. *Surface Water Pollution*. 2019:261-92.
29. AL JSE. DETERMINACION DE LA DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO (DQO) Y DEMANDA INMEDIATA DE OXIGENO (DIO) DE UN AGUA, MEDIANTE SALES DE CERIO (IV) *Anal Bromatol XXXVII-1* 1985:125-42.
30. Särkkä H, Vepsäläinen M, Sillanpää M. Natural organic matter (NOM) removal by electrochemical methods — A review. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2015;755:100-8.
31. Vepsäläinen M, Ghiasvand M, Selin J, Pienimaa J, Repo E, Pulliainen M, et al. Investigations of the effects of temperature and initial sample pH on natural organic matter (NOM) removal with electrocoagulation using response surface method (RSM). *Separation and Purification Technology*. 2009;69(3):255-61.
32. HG. CG. *Tratamiento de Aguas para Abastecimiento Publico*. Barcelona: Editores Tecnicos Asociados. 1977.

33. DeGremont. Manual Técnico del Agua. ISBN. 1979;CUARTA EDICION.
34. XIMENA CEA. MONTAJE Y VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE ANÁLISIS POR COMBUSTIÓN Y DETECCIÓN POR INFRARROJO NO DISPERSIVO PARA DETERMINACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT) EN AGUA. Revista Luna Azul ISSN 1909-2474. 2009.
35. Total organic carbon removal instrumentation. Filtration + Separation. 2018;55(4):32-4.
36. Fuentes R, Ramos J, Jimenez M, Esparza M. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DISUELTA EN AGUA SUBTERRÁNEA DEL VALLE DE TOLUCA MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA DE FLUORESCENCIA 3D. Rev Int Contam Ambie. 2015;31(3).
37. Mazumder M, Ahmed R, Wajahat Ali A, Lee S-J. SEM and ESEM techniques used for analysis of asphalt binder and mixture: A state of the art review. Construction and Building Materials. 2018;186:313-29.
38. Goldstein J, Newbury D, Joy D, Lyman C, Echlin p, Lifshin E, et al. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. 2003.
39. Kristo MJ. Chapter 21 - Nuclear Forensics. In: L'Annunziata MF, editor. Handbook of Radioactivity Analysis (Third Edition). Amsterdam: Academic Press; 2012. p. 1281-304.
40. Kirk TL. A Review of Scanning Electron Microscopy in Near Field Emission Mode. 2017;204:39-109.
41. Rajeshkumar S, Bharath LV, Geetha R. Chapter 17 - Broad spectrum antibacterial silver nanoparticle green synthesis: Characterization, and mechanism of action. In: Shukla AK, Iravani S, editors. Green Synthesis, Characterization and Applications of Nanoparticles: Elsevier; 2019. p. 429-44.
42. Greenberg J, Iniewski K. X-ray diffraction imaging, technology and applications. Taylor & Francis Group. 2019.
43. Thiodjio Sendja B, Tchana Kamgne D, Aquilanti G, Olivi L, Plaisier JR. Low-range thermal investigation of zincblende-type ZnS by combined extended X-ray

- absorption fine structure and X-ray diffraction techniques. *Physica B: Condensed Matter*. 2018;545:481-90.
44. Lau E. 5 - Preformulation Studies. In: Ahuja S, Scypinski S, editors. *Separation Science and Technology*. 3: Academic Press; 2001. p. 173-233.
45. Chatterjee AK. 8 - X-Ray Diffraction. In: Ramachandran VS, Beaudoin JJ, editors. *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*. Norwich, NY: William Andrew Publishing; 2001. p. 275-332.
46. Peralta RM, da Silva BP, Gomes Côrrea RC, Kato CG, Vicente Seixas FA, Bracht A. Enzymes from Basidiomycetes—Peculiar and Efficient Tools for Biotechnology. 2017:119-49.
47. Cardoso WS, Queiroz PV, Tavares GP, Santos FA, Soares FEF, Kasuya MCM, et al. Multi-enzyme complex of white rot fungi in saccharification of lignocellulosic material. *Braz J Microbiol*. 2018;49(4):879-84.
48. Sigoillot J-C, Berrin J-G, Bey M, Lesage-Meessen L, Levasseur A, Lomascolo A, et al. *Fungal Strategies for Lignin Degradation*. 2012;61:263-308.
49. Abdel-Hamid AM, Solbiati JO, Cann IK. Insights into lignin degradation and its potential industrial applications. *Adv Appl Microbiol*. 2013;82:1-28.
50. ASSOCIATION APH. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater Método 5220-D. 22*, editor. New York 2012.
51. Mibei G. *INTRODUCTION TO TYPES AND CLASSIFICATION OF ROCKS. Rock types and classification 2014*.
52. JA. D. *Geology and Landscape Evolution (Second Edition)*
ELSEVIER USA. 2018.
53. AL ITE. Proveniencia sedimentaria de las rocas detríticas del Grupo Yura (Jurásico-Cretáceo) en Tacna, basado en análisis de minerales pesados. XVIII Congreso Peruano de Geología. 2016.
54. VIDAL JC. *GEOLOGIA DE LOS CUADRANGULOS DE SAN JUAN, ACARI Y YAUCA. INSTITUTO DE GEOLOGIA Y MINERIA*. 1978;30.

55. MACEDO SCM. Caracterización geoquímica orgánica del Grupo Ambo en la cuenca Ucayali Sur-Perú UNMSM. 2017.
56. Heidmann I, Calmano W. Removal of Zn(II), Cu(II), Ni(II), Ag(I) and Cr(VI) present in aqueous solutions by aluminium electrocoagulation. *J Hazard Mater.* 2008;152(3):934-41.
57. Koby M, Delipinar S. Treatment of the baker's yeast wastewater by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials.* 2008;154(1):1133-40.
58. KAZEM G, AL E. Electrochemical treatment of Poultry Slaughterhouse Wastewater using Iron and Aluminium Electrodes. *Research Journal of Chemistry and Environment* 2012;16(3).
59. Rincon GJ, La Motta EJ. Simultaneous removal of oil and grease, and heavy metals from artificial bilge water using electro-coagulation/flotation. *J Environ Manage.* 2014;144:42-50.
60. Gatsios E, Hahladakis JN, Gidaracos E. Optimization of electrocoagulation (EC) process for the purification of a real industrial wastewater from toxic metals. *Journal of Environmental Management.* 2015;154:117-27.
61. Mansoorian HJ, Mahvi AH, Jafari AJ. Removal of lead and zinc from battery industry wastewater using electrocoagulation process: Influence of direct and alternating current by using iron and stainless steel rod electrodes. *Separation and Purification Technology.* 2014;135:165-75.
62. Zewail TM, Yousef NS. Chromium ions (Cr^{6+} & Cr^{3+}) removal from synthetic wastewater by electrocoagulation using vertical expanded Fe anode. *Journal of Electroanalytical Chemistry.* 2014;735:123-8.
63. Shafaei A, Rezaie M, Nikazar M. Evaluation of Mn^{2+} and Co^{2+} removal by electrocoagulation: A case study. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification.* 2011;50(11-12):1115-21.
64. Koby M, Hiz H, Senturk E, Aydinler C, Demirbas E. Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Desalination.* 2006;190(1):201-11.

65. Can OT, Gengec E, Kobya M. TOC and COD removal from instant coffee and coffee products production wastewater by chemical coagulation assisted electrooxidation. *Journal of Water Process Engineering*. 2019;28:28-35.
66. Ni'am M, Othman F, Sohaili J, Fauzia Z. Electrocoagulation technique for removal of COD and turbidity to improve wastewater quality 2008. 36-42 p.
67. Galinha CF, Sanches S, Crespo JG. Membrane bioreactors. 2018:209-49.
68. Myllymäki P, Lahti R, Romar H, Lassi U. Removal of total organic carbon from peat solution by hybrid method—Electrocoagulation combined with adsorption. *Journal of Water Process Engineering*. 2018;24:56-62.
69. Kıyak T, Kabasakalodlu M. Anodic behavior of cathodically pretreated aluminum electrode. *Applied Surface Science*. 1999;140(1):33-45.
70. Mouedhen G, Feki M, Wery Mde P, Ayedi HF. Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. *J Hazard Mater*. 2008;150(1):124-35.
71. Golan-Rozen N, Seiwert B, Riemenschneider C, Reemtsma T, Chefetz B, Hadar Y. Transformation Pathways of the Recalcitrant Pharmaceutical Compound Carbamazepine by the White-Rot Fungus *Pleurotus ostreatus*: Effects of Growth Conditions. *Environ Sci Technol*. 2015;49(20):12351-62.
72. LIVEFWOCHE D, JURASEK L, DESROCHERS M, DORICA J. Removal of Color from Kraft Mill Wastewaters with Cultures of White-Rot Fungi and with Immobilized Mycelium of *Coriolus Vemicolo*. *Biotechnology and Bioengineering*. 1983;XXV:2055-65
73. Lyu J, Park J, Kumar Pandey L, Choi S, Lee H, De Saeger J, et al. Testing the toxicity of metals, phenol, effluents, and receiving waters by root elongation in *Lactuca sativa* L. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2018;149:225-32.
74. Park J, Yoon JH, Depuydt S, Oh JW, Jo YM, Kim K, et al. The sensitivity of an hydroponic lettuce root elongation bioassay to metals, phenol and wastewaters. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2016;126:147-53.
75. Cesaro A, Belgiorno V, Guida M. Compost from organic solid waste: Quality assessment and European regulations for its sustainable use. *Resources, Conservation and Recycling*. 2015;94:72-9.



Anexo 1:

Tabla 3. Datos utilizados para la curva patrón de DQO

Concentración (ppm)	Absorbancia 1 (nm)	Absorbancia 2 (nm)	Absorbancia 3 (nm)	Absorbancia promedio (nm)
100	0.0084	0.0143	0.0144	0.0123 ± 0.0034
200	0.0395	0.0387	0.0405	0.0396 ± 0.0009
400	0.1056	0.1098	0.1125	0.1093 ± 0.0035
600	0.1557	0.1503	0.16	0.1553 ± 0.0049
800	0.2163	0.2182	0.2211	0.2186 ± 0.0024
1000	0.2745	0.2658	0.2648	0.2684 ± 0.0053



Anexo 2

Tabla 4. Porcentaje de remoción de DQO para la muestra A

Intensidad de corriente (mA)	pH	Tiempo(min)	Abs	KHP	DQO	% de remoción DQO
100	8	60	0.0808	315.6667	369.6457	51.4359
		45	0.0830	323.0667	378.3111	50.2974
		30	0.1271	470.0000	550.3700	27.6923
		15	0.1699	612.6667	717.4327	5.7436
		0	0.1811	650.0000	761.1500	0.0000
	6	60	0.0922	353.6667	414.1437	59.2550
		45	0.0951	363.3333	425.4633	58.1413
		30	0.1458	532.3333	623.3623	38.6713
		15	0.2019	719.3333	842.3393	17.1275
		0	0.2465	868.0000	1016.4280	0.0000
	4	60	0.0866	335.0000	392.2850	53.0154
		45	0.0878	339.0000	396.9690	52.4544
		30	0.1036	391.5667	458.5246	45.0818
		15	0.1519	552.6667	647.1727	22.4871
		0	0.2000	713.0000	834.9230	0.0000
300 mA	8	60	0.0314	151.0000	176.8210	79.5208
		45	0.0601	246.6667	288.8467	66.5461
		30	0.0802	313.6667	367.3037	57.4593
		15	0.1120	419.6667	491.4297	43.0832
		0	0.2073	737.3333	863.4173	0.0000
	6	60	0.0524	221.0000	258.7910	71.9424
		45	0.0542	227.0000	265.8170	71.1807
		30	0.0852	330.3333	386.8203	58.0618
		15	0.1178	439.0000	514.0690	44.2658
		0	0.2224	787.6667	922.3577	0.0000
	4	60	0.0834	324.3333	379.7943	60.2045
		45	0.0828	322.3333	377.4523	60.4499
		30	0.0932	357.0000	418.0470	56.1963
		15	0.1062	400.3333	468.7903	50.8793
		0	0.2306	815.0000	954.3650	0.0000
500 mA	8	60	0.0834	324.3333	379.7943	52.0926
		45	0.0987	375.3333	439.5153	44.5593
		30	0.1331	490.0000	573.7900	27.6219
		15	0.1455	531.3333	622.1913	21.5165
		0	0.1892	677.0000	792.7670	0.0000
	6	60	0.0341	160.0000	187.3600	82.4626
		45	0.0970	369.6667	432.8797	59.4812
		30	0.1070	403.0000	471.9130	55.8275
		15	0.1363	500.6667	586.2807	45.1224
		0	0.2598	912.3333	1068.3423	0.0000
	4	60	0.0728	289.0000	338.4190	71.3578
		45	0.0835	324.6667	380.1847	67.8229
		30	0.1555	564.6667	661.2247	44.0370
		15	0.1728	622.3333	728.7523	38.3218
		0	0.2888	1009.0000	1181.5390	0.0000

Anexo 3:

Tabla 5. Porcentaje de remoción de DQO para la muestra B

Intensidad de corriente (mA)	pH	Tiempo(min)	Abs	KHP	DQO	% de remoción DQO
100	8	60	0.0548	229.0000	268.1590	44.4175
		45	0.0560	233.0000	272.8430	43.4466
		30	0.0601	246.6667	288.8467	40.1294
		15	0.0802	313.6667	367.3037	23.8673
		0	0.1097	412.0000	482.4520	0.0000
	6	60	0.0598	245.6667	287.6757	63.7838
		45	0.0674	271.0000	317.3410	60.0491
		30	0.0760	299.6667	350.9097	55.8231
		15	0.0964	367.6667	430.5377	45.7985
		0	0.1896	678.3333	794.3283	0.0000
	4	60	0.1211	450.0000	526.9500	67.3834
		45	0.1236	458.3333	536.7083	66.7794
		30	0.1569	569.3333	666.6893	58.7340
		15	0.3295	1144.6667	1340.4047	17.0331
		0	0.4000	1379.6667	1615.5897	0.0000
300 mA	8	60	0.0306	148.3333	173.6983	65.9786
		45	0.0378	172.3333	201.8023	60.4740
		30	0.0640	259.6667	304.0697	40.4434
		15	0.0958	365.6667	428.1957	16.1315
		0	0.1169	436.0000	510.5560	0.0000
	6	60	0.0623	254.0000	297.4340	63.0456
		45	0.0694	277.6667	325.1477	59.6023
		30	0.1059	399.3333	467.6193	41.9011
		15	0.1551	563.3333	659.6633	18.0407
		0	0.1923	687.3333	804.8673	0.0000
	4	60	0.1567	568.6667	665.9087	50.3203
		45	0.1624	587.6667	688.1577	48.6605
		30	0.1842	660.3333	773.2503	42.3122
		15	0.2359	832.6667	975.0527	27.2568
		0	0.3295	1144.6667	1340.4047	0.0000
500 mA	8	60	0.0717	285.3333	334.1253	40.3068
		45	0.0724	287.6667	336.8577	39.8187
		30	0.0942	360.3333	421.9503	24.6165
		15	0.1159	432.6667	506.6527	9.4840
		0	0.1295	478.0000	559.7380	0.0000
	6	60	0.0505	214.6667	251.3747	72.4079
		45	0.0924	354.3333	414.9243	54.4559
		30	0.1423	520.6667	609.7007	33.0763
		15	0.1659	599.4667	701.9755	22.9477
		0	0.2195	778.0000	911.0380	0.0000
	4	60	0.0806	315.0000	368.8650	71.5704
		45	0.0993	377.3333	441.8573	65.9446
		30	0.1751	630.0000	737.7300	43.1408
		15	0.2169	769.3333	900.8893	30.5656
		0	0.3185	1108.0000	1297.4680	0.0000

Anexo 4:

Tabla 6. Porcentaje de remoción de COT para la muestra A

Intensidad de corriente (mA)	pH	Tiempo(min)	TOC	% de remoción TOC
100	8	60	49.9700	17.4595
		45	50.0300	17.3604
		30	52.7800	12.8180
		15	57.4100	5.1701
		0	60.5400	0.0000
	6	60	44.2900	31.5773
		45	45.3800	29.8934
		30	50.5500	21.9064
		15	52.2500	19.2801
		0	64.7300	0.0000
	4	60	45.7400	35.8305
		45	45.8800	35.6341
		30	48.0400	32.6038
		15	52.4000	26.4871
		0	71.2800	0.0000
300 mA	8	60	38.9400	37.6261
		45	46.8500	24.9560
		30	48.9700	21.5601
		15	58.7800	5.8465
		0	62.4300	0.0000
	6	60	33.7100	41.9194
		45	36.0100	37.9566
		30	43.1800	25.6030
		15	52.1000	10.2343
		0	58.0400	0.0000
	4	60	42.1600	40.5360
		45	42.3400	40.2821
		30	42.6900	39.7884
		15	48.5500	31.5233
		0	70.9000	0.0000
500 mA	8	60	37.7500	25.1289
		45	41.0800	18.5244
		30	43.5000	13.7247
		15	43.8300	13.0702
		0	50.4200	0.0000
	6	60	36.0000	59.0723
		45	58.9000	33.0377
		30	60.5800	31.1278
		15	61.5400	30.0364
		0	87.9600	0.0000
	4	60	58.6900	58.6690
		45	58.1300	59.0634
		30	58.2300	58.9930
		15	63.5300	55.2606
		0	142.0000	0.0000

Anexo 5:

Tabla 7. Porcentaje de remoción de COT para la muestra B

Intensidad de corriente (mA)	pH	Tiempo(min)	TOC	% de remoción TOC	
100	8	60	26.2700	31.6597	
		45	27.6400	28.0957	
		30	28.8400	24.9740	
		15	35.0500	8.8189	
		0	38.4400	0.0000	
	6	60	27.1700	32.9632	
		45	29.2200	27.9053	
		30	35.2500	13.0274	
		15	37.2600	8.0681	
		0	40.5300	0.0000	
	4	60	37.6900	38.0303	
		45	39.1400	35.6462	
		30	43.2800	28.8392	
		15	52.0100	14.4854	
		0	60.8200	0.0000	
	300 mA	8	60	23.2630	59.9466
			45	24.4670	57.8736
			30	36.0100	37.9993
			15	46.7900	19.4387
			0	58.0800	0.0000
6		60	15.8800	71.3461	
		45	16.2900	70.6063	
		30	29.7400	46.3371	
		15	52.4500	5.3591	
		0	55.4200	0.0000	
4		60	18.5700	43.4875	
		45	19.8900	39.4705	
		30	21.8500	33.5058	
		15	28.0300	14.6987	
		0	32.8600	0.0000	
500 mA		8	60	17.1100	69.8236
			45	17.7300	68.7302
			30	21.2900	62.4515
			15	45.3300	20.0529
			0	56.7000	0.0000
	6	60	14.4000	72.8302	
		45	18.9700	64.2075	
		30	32.5100	38.6604	
		15	45.0600	14.9811	
		0	53.0000	0.0000	
	4	60	16.2563	64.6602	
		45	16.4590	64.2196	
		30	22.4900	51.1087	
		15	32.5100	29.3261	
		0	46.0000	0.0000	

Anexo 6:

Tabla 8. DQO Relación entre Intensidad de corriente y muestras A y B

Clasificación por Intensidad de Corriente	Porcentaje de remoción (A)	N	Sig.	Porcentaje de remoción (B)	N	Sig.
100	32.0935	15		39.1496	15	
300	47.9860	15	0.24	35.6111	15	0.84
500	40.6816	15		33.8891	15	
Total	40.2537	45		36.2166	45	

Tabla 9. DQO Relación entre pH y muestras A y B

Clasificación por pH	Porcentaje de remoción (A)	N	Sig.	Porcentaje de remoción (B)	N	Sig.
8	35.1713	15		29.9409	15	
6	44.1026	15	0.628	39.3955	15	0.477
4	41.4872	15		39.3133	15	
Total	40.2537	45		36.2166	45	

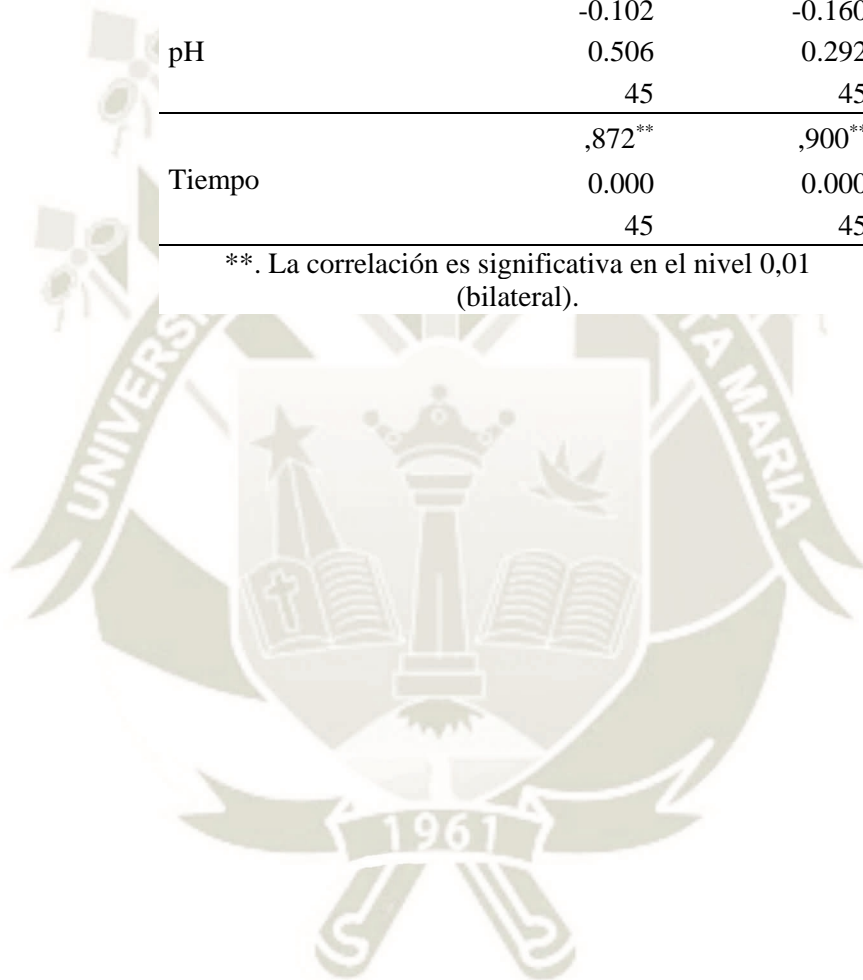
Tabla 10. DQO Relación entre tiempo (min) y muestras A y B

Clasificación por tiempo	Porcentaje de remoción (A)	N	Sig.	Porcentaje de remoción (B)	N	Sig.
60	64.5874	9		59.9127	9	
45	58.9926	9		55.4701	9	
30	45.6277	9	0.000	42.2417	9	0.000
15	32.0608	9		23.4584	9	
0	0.0000	9		0.0000	9	
Total	40.2537	45		36.2166	45	

Tabla 11. DQO Correlación de Pearson

	Porcentaje de remoción (A)	Porcentaje de remoción (B)
Intensidad de Corriente	0.138	-0.090
	0.364	0.556
	45	45
pH	-0.102	-0.160
	0.506	0.292
	45	45
Tiempo	,872**	,900**
	0.000	0.000
	45	45

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01
(bilateral).



Anexo 7

Tabla 12. COT Relación entre Intensidad de corriente y muestras A y B

Clasificación por Intensidad de Corriente	Porcentaje de remoción (A)	N	Sig.	Porcentaje de remoción (B)	N	Sig.
100	19.0680	15		19.5008	15	
300	23.8560	15	0.616	33.3380	15	0.044
500	19.2073	15		41.4035	15	
Total	20.7104	45		31.4141	45	

Tabla 13. COT Relación pH y muestras A y B

Clasificación por pH	Porcentaje de remoción (A)	N	Sig.	Porcentaje de remoción (B)	N	Sig.
8	14.2167	15		32.6577	15	
6	24.7767	15	0.111	31.0860	15	0.971
4	23.1380	15		30.4985	15	
Total	20.7104	45		31.4141	45	

Tabla 14. COT Relación entre tiempo y muestras A y B

Clasificación por tiempo	Porcentaje de remoción (A)	N	Sig.	Porcentaje de remoción (B)	N	Sig.
60	34.0667	9		53.8609	9	
45	28.4300	9		50.7506	9	
30	24.1356	9	0.000	37.4336	9	0.000
15	16.9200	9		15.0254	9	
0	0.0000	9		0.0000	9	
Total	20.7104	45		31.4141	45	

Tabla 15. Correlación de Pearson TOC muestras A y B

	Porcentaje de remoción (A)	Porcentaje de remoción (B)
Intensidad de Corriente	0.004	,368*
	0.980	0.013
	45	45
pH	-0.247	0.036
	0.101	0.813
	45	45
Tiempo	,765**	,835**
	0.000	0.000
	45	45

*. La correlación es significativa en el nivel
0,05 (bilateral).

** . La correlación es significativa en el nivel
0,01 (bilateral).

Anexo 8

Tabla 16. Medida de halo de crecimiento de *Pleurotus sajor caju* en muestra A

Concentración	Nº de Placa	Día 1	Día 3	Día 5	Día 7	Promedio	Muestra A	Desviación estándar
100%	1	0.8	1.5	2.1	2.5	1.73	1.81	0.11
	2	0.4	1.8	2.2	2.65	1.76		
	3	0.75	1.7	2.55	2.75	1.94		
50%	1	0.7	1.65	2.3	2.5	1.79	1.80	0.06
	2	0.4	1.45	2.35	2.8	1.75		
	3	0.8	1.8	2.3	2.6	1.88		
25%	1	0.65	1.7	2.3	2.71	1.84	1.86	0.05
	2	0.7	1.7	2.5	2.8	1.93		
	3	0.65	1.65	2.4	2.6	1.83		
10%	1	0.6	1.7	2.35	2.7	1.84	1.77	0.12
	2	0.6	1.4	2.05	2.5	1.64		
	3	0.7	1.55	2.3	2.8	1.84		
5%	1	0.8	1.4	1.7	2.3	1.55	1.53	0.04
	2	0.5	1.5	1.7	2.25	1.49		
	3	0.7	1.4	1.8	2.3	1.55		

Anexo 9:

Tabla 17. Medida de halo de crecimiento de *Pleurotus sajor caju* en muestra B

Concentración	Nº de Placa	Día 1	Día 3	Día 5	Día 7	Promedio	Muestra B	Desviación estándar
100%	1	0.5	1	1.3	1.55	1.09	1.13	0.05
	2	0.4	1	1.35	1.65	1.10		
	3	0.45	1	1.5	1.8	1.19		
50%	1	0.5	1.65	2	2.3	1.61	1.61	0.08
	2	0.5	1.65	2.25	2.35	1.69		
	3	0.5	1.5	1.9	2.2	1.53		
25%	1	0.4	1.4	2	2.4	1.55	1.72	0.17
	2	0.7	1.95	2.3	2.6	1.89		
	3	0.5	1.6	2.1	2.7	1.73		
10%	1	0.5	1.85	2.2	2.5	1.76	1.53	0.23
	2	0.4	1.8	1.6	2.3	1.53		
	3	0.4	1	1.75	2.05	1.30		
5%	1	0.5	1.1	1.6	2.05	1.31	1.25	0.10
	2	0.5	0.8	1.3	1.9	1.13		
	3	0.4	1.1	1.7	2	1.30		

Anexo 10:

Tabla 18. DQO muestra A luego del tratamiento electroquímico

Intensidad de corriente (mA)	pH	Tiempo (h)	Abs (nm)	% de remoción		
				KHP	DQO	DQO A
500	6	384	0.01	85.33	99.93	46.89
		336	0.01	85.67	100.32	46.68
		288	0.01	88.00	103.05	45.23
		240	0.01	91.33	106.95	43.15
		192	0.02	100.33	117.49	37.55
		144	0.02	111.33	130.37	30.71
		96	0.03	132.33	154.96	17.63
		48	0.03	147.00	172.14	8.51
		24	0.03	155.67	182.29	3.11
		12	0.03	160.67	188.14	0.00
		0	0.03	160.67	188.14	0.00

Tabla 19. DQO muestra B luego del tratamiento electroquímico

Intensidad de corriente (mA)	pH	Tiempo (h)	Abs (nm)	% de remoción		
				KHP	DQO	DQO B
500	6	384	0.03	142.67	167.06	33.64
		336	0.03	143.00	167.45	33.49
		288	0.03	146.33	171.36	31.94
		240	0.03	153.00	179.16	28.84
		192	0.04	172.33	201.80	19.84
		144	0.04	183.67	215.07	14.57
		96	0.04	188.00	220.15	12.56
		48	0.05	197.67	231.47	8.06
		24	0.05	212.33	248.64	1.24
		12	0.05	214.33	250.98	0.31
		0	0.05	215.00	251.77	0.00

Tabla 20. COT muestra A luego del tratamiento electroquímico

Intensidad de corriente (mA)	pH	Tiempo (h)	COT	% de remoción COT A
500	6	384	11.2	69.06
		336	11.28	68.84
		288	11.65	67.82
		240	11.96	66.96
		192	12.87	64.45
		144	13.66	62.27
		96	16.47	54.50
		48	19.21	46.93
		24	25.87	28.54
		12	34.64	4.31
		0	36.2	0.00

Tabla 21. COT muestra B luego del tratamiento electroquímico

Intensidad de corriente (mA)	pH	Tiempo (h)	COT	% de remoción COT B
500	6	384	9.28	35.64
		336	9.31	35.44
		288	9.32	35.37
		240	9.34	35.23
		192	9.52	33.98
		144	9.76	32.32
		96	10.87	24.62
		48	11.42	20.80
		24	12.46	13.59
		12	14.3	0.83
		0	14.42	0.00

Anexo 11:

Tabla 22. Porcentaje de reducción DQO y COT total de la muestra A

Intensidad de corriente (mA)	pH	Tratamiento	Tiempo(min)	Abs	KHP	DQO	% de remoción DQO A	COT	% de remoción COT A
500	6	Biológico	384	0.01	85.33	99.93	90.65	11.20	87.27
			336	0.01	85.67	100.32	90.61	11.28	87.18
			288	0.01	88.00	103.05	90.35	11.65	86.76
			240	0.01	91.33	106.95	89.99	11.96	86.40
			192	0.02	100.33	117.49	89.00	12.87	85.37
			144	0.02	111.33	130.37	87.80	13.66	84.47
			96	0.03	132.33	154.96	85.50	16.47	81.28
			48	0.03	147.00	172.14	83.89	19.21	78.16
			24	0.03	155.67	182.29	82.94	25.87	70.59
		12	0.03	160.67	188.14	82.39	34.64	60.62	
		0	0.03	160.67	188.14	82.39	36.20	58.84	
		Electroquímico	60	0.03	160.00	187.36	82.46	36.00	59.07
			45	0.10	369.67	432.88	59.48	58.90	33.04
			30	0.11	403.00	471.91	55.83	60.58	31.13
			15	0.14	500.67	586.28	45.12	61.54	30.04
0	0.26		912.33	1068.34	0.00	87.96	0.00		

Tabla 23. Porcentaje de reducción DQO y TOC total de la muestra B

Intensidad de corriente (mA)	pH	Tratamiento	Tiempo(min)	Abs	KHP	DQO	% de remoción DQO B	COT	% de remoción COT B
500	6	Biológico	384	0.03	142.67	167.06	81.66	9.28	82.49
			336	0.03	143.00	167.45	81.62	9.31	82.43
			288	0.03	146.33	171.36	81.19	9.32	82.42
			240	0.03	153.00	179.16	80.33	9.34	82.38
			192	0.04	172.33	201.80	77.85	9.52	82.04
			144	0.04	183.67	215.07	76.39	9.76	81.58
			96	0.04	188.00	220.15	75.84	10.87	79.49
			48	0.05	197.67	231.47	74.59	11.42	78.45
			24	0.05	212.33	248.64	72.71	12.46	76.49
			12	0.05	214.33	250.98	72.45	14.30	73.02
		0	0.05	215.00	251.77	72.37	14.42	72.79	
		Electroquímico	60	0.05	214.67	251.37	72.41	14.40	72.83
			45	0.09	354.33	414.92	54.46	18.97	64.21
			30	0.14	520.67	609.70	33.08	32.51	38.66
			15	0.17	599.47	701.98	22.95	45.06	14.98
0	0.22		778.00	911.04	0.00	53.00	0.00		

Anexo 12:

Tabla 24. Promedios de crecimiento *L. Sativa* para muestra A y B

Muestra A						
Denominación	Control (NaCl)	Control (H ₂ O)	25%	50%	75%	100%
G1	0	20	19	19	18	17
L1	SC	5.1	3.5	3.8	3.0	1.5
G2	0	20	20	20	20	20
L2	SC	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
RRG (%)	-	100.0	67.9	74.9	59.3	28.8
GI (%)	-	100.0	64.5	71.2	53.3	24.5
Muestra B						
Denominación	Control (NaCl)	Control (H ₂ O)	25%	50%	75%	100%
G1	0	20	19	18	17	16
L1	SC	5.0	4.2	4.9	4.1	2.4
G2	0	20	20	20	20	20
L2	SC	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
RRG (%)	-	100.0	85.0	98.3	83.0	48.7
GI (%)	-	100.0	80.7	88.5	70.6	39.0