

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA**



**Diseño de una Celda Electroquímica para la reducción de la  
concentración de cadmio en disolución acuosa.**

**Steebenss Obdulio Rosales Pérez**

**Guatemala, marzo de 2018**

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA**



**Diseño de una Celda Electroquímica para la reducción de la  
concentración de cadmio en disolución acuosa.**

**Informe de Tesis**

**Presentado por**

**Steebenss Obdulio Rosales Pérez**

**Para optar al título de  
QUIMICO**

**Guatemala, marzo de 2018**

### **Junta Directiva**

Dr. Rubén Dariel Velásquez Miranda	Decano
M.A. Elsa Julieta Salazar Meléndez de Ariza	Secretaria
MSc. Miriam Carolina Guzmán Quilo	Vocal I
Dr. Juan Francisco Pérez Sabino	Vocal II
Lic. Carlos Manuel Maldonado Aguilera	Vocal III
Br. Andreina Delia Irene López Hernández	Vocal IV
Br. Carol Andrea Betancourt Herrera	Vocal V

## **Agradecimientos**

A mi alma mater Universidad de San Carlos de Guatemala, a la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia y a la Escuela de Química por el privilegio de recibir educación superior.

A los diferentes departamentos de la escuela de Química: Química General, Química Orgánica, Análisis Inorgánico, Fisicoquímica y la Unidad de Análisis Instrumental por haberme ayudado en mi formación académica.

Al Laboratorio INLASA y al Departamento de Fisicoquímica, por haberme dado la oportunidad de laborar en el área de mi formación.

Al Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y al departamento de Fisicoquímica por brindarme sus instalaciones, espectrofotómetro de absorción atómica, reactivos y la cristalería necesaria para la investigación, en especial a Lic. Francisco Barrios y TL. José Morales.

A las personas involucradas en el éxito de esta investigación Lic. Oswaldo Martínez, Lic. Manuel Muñoz, Licda. Idolly Carranza, MA. Rodolfo Orozco, MSc. Byron Fuentes y M.A. Nohemí Orozco.

## **Dedicatoria**

A Dios, por haberme permitido alcanzar este logro.

A mis padres: Rosa y Obdulio, por todo su apoyo.

A mi hermano Ludvin, por su ejemplo y sabios consejos.

A mis Abuelos: Eliseo Rosales Q.D.E.P, Francisco Pérez Q.D.E.P, Emilia Dávila Q.D.E.P y Berta Ávila, por su apoyo incondicional.

A mis Tíos: Por sus consejos.

A mis catedráticos: por ser guías en mi formación académica.

A mis compañeros de la Facultad: Por su apoyo y toda su amistad.

A mi amigo Julio Ramos Q.D.E.P. por todos los momentos que compartimos.

## Índice

Contenido	pág.
I. Resumen	7
II. Introducción	8
III. Antecedentes	9
A. Cadmio	9
1. Generalidades del Cadmio	9
2. Historia del Cadmio	10
3. Propiedades Físicas	11
4. Propiedades Químicas	11
5. Usos del Cadmio	12
6. Toxicidad del Cadmio	13
7. Valores de Referencia de Cadmio en Agua Potable	14
8. Determinación de Cadmio por Absorción Atómica	15
B. Electroquímica	16
1. Generalidades	16
2. Usos de la Electroquímica	16
3. Principios de Electricidad	17
4. Celda Electroquímica	18
a) Tipos de Celdas Electroquímicas	18
i. Celdas Galvánica	18
ii. Celda Electrolítica	18
5. Proceso Electrolítico	19
6. Ley de Nernst	19
7. Ley de Faraday	20
8. Aplicaciones de la Electroquímica en Remediación	21
a) Estudios a nivel nacional	21
b) Estudios a nivel internacional	22
9. Electrodo	24
IV. Justificación	25
V. Objetivos	26

VI. Hipótesis	27
VII. Materiales y Métodos	28
A. Universo	28
B. Muestra	28
C. Materiales	28
1. Equipo de Laboratorio	28
2. Reactivos	28
3. Herramientas y Materiales	29
4. Cristalería	29
D. Metodología a utilizar en el Estudio	29
1. Diseño de la Investigación	29
2. Procedimiento	31
a) Preparación de la Muestra	31
b) Preparación del Electrolito	31
c) Preparación de la Celda Electroquímica	31
d) Determinación de Cadmio	32
VIII. Resultados	34
IX. Discusión	37
X. Conclusiones	40
XI. Recomendaciones	41
XII. Referencias	42
XII. Anexos	45

## I. RESUMEN

Se realizó el diseño de una celda electroquímica para reducir la concentración de cadmio en solución acuosa. En esta investigación se determinaron las condiciones óptimas de una celda electroquímica que permita reducir el mayor contenido de cadmio en solución en base a su potencial de electrodo, de igual manera comparar la reducción de cadmio con los electrodos de referencia de platino, grafito y de acero inoxidable. Para llevar a cabo este diseño se prepararon 56 muestras con un volumen de 50 mililitros a una concentración de 0.5 partes por millón de cadmio y 0.5 Moles/Litros de sulfato de sodio. Posteriormente se realizó el tratamiento electroquímico a 54 muestras utilizando los electrodos de platino, acero inoxidable y grafito, a diferentes potenciales 2 voltios, 4 voltios y 6 voltios, las otras seis muestras se utilizaron como control de comparación. Después de la reducción electroquímica se procedió a determinar la concentración de cadmio, para lo cual se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer modelo 3110, se obtuvo una diferencia significativa con un nivel de confianza del 95% entre las diferentes muestras analizadas. El mayor porcentaje de reducción de cadmio en solución se obtuvo con los electrodos de grafito a un potencial de 4 voltios.

## II. INTRODUCCION

El cadmio es un elemento metálico, que se utiliza en galvanoplastia, constituyente de pigmentos, estabilizantes de plásticos, en la fabricación de pilas, fertilizantes fosfatados artificiales y drenaje de minas (zinc y plomo). Es uno de los metales más tóxicos con una Dosis letal en ratón LD50 = 890 mg/Kg. Este metal conjuntamente con el plomo y el mercurio forman el grupo de los tres metales pesados.

La electroquímica es una rama de la química que estudia la interacción y correlación de los procesos químicos y eléctricos mediante las reacciones de óxido-reducción. La electroquímica puede aplicarse para estudiar, controlar, mitigar, o tratar residuos industriales, mejoras de tecnologías ya existentes, así como la investigación, desarrollo e implementación de nuevas tecnologías. Su estudio y control está relacionado con las posibilidades que brinda el electroanálisis al emplear técnicas que permiten reducir, transformar o incluso eliminar residuos tóxicos, especialmente, la purificación de una solución de líquidos de proceso de metales pesados, como ocurre en las aguas residuales, donde es posible recuperar metales pesados en su forma más pura, debido a que muchos de los compuestos que conforman estas aguas son electroactivos, presentando la posibilidad de ser tratados a través de un proceso electroquímico (GIL, 2012).

En la presente investigación se diseñó una celda electroquímica para la reducción de la concentración de cadmio en disolución acuosa. Para lo cual se realizó una celda electroquímica utilizando electrodos de acero inoxidable, grafito y de platino, una fuente como generador de potenciales (2V, 4V y 6V), que permitió reducir la concentración de cadmio en solución acuosa. Para Cuantificar la reducción de cadmio se utilizó espectrofotometría de absorción atómica a la llama.

### III. ANTECEDENTES

#### A. Cadmio

##### 1. Generalidades del Cadmio

Es un elemento metálico, que tiene un color azulado similar a la plata, es blando, dúctil y maleable. A causa de su reactividad no se encuentra nativo en la corteza terrestre, y se encuentra asociado a minerales de zinc. La producción mundial de cadmio es de alrededor de 15,000 toneladas por año, siendo utilizado principalmente en galvanoplastia y como constituyente de pigmentos y estabilizantes de plásticos, también es muy empleado en la fabricación de pilas. Fertilizantes fosfatados artificiales y drenaje de minas (zinc y plomo) representan también fuentes considerables de este metal (Marín, 2003, pág. 311).

El cadmio puede ser transportado a grandes distancias cuando es absorbido por el lodo, y este lodo puede llegar a contaminar aguas superficiales y suelos. Este metal es fuertemente absorbido por la materia orgánica del suelo. En ecosistemas acuáticos, el cadmio puede biocumularse y biomagnificarse en mejillones, ostras, gambas, langostas y peces. Los animales que comen o beben cadmio algunas veces presentan: la presión sanguínea alta, daños en el hígado y daños en nervios y cerebro (ATSDR, 1999).

El óxido de cadmio (CdO), sólido, insoluble en agua, pero soluble en soluciones ácidas diluidas o amoniacales, es el principal producto de la combustión del Cd metálico. Se utiliza para la fabricación de baterías Ni-Cd, como catalizador de reacciones orgánicas de hidrogenación y deshidrogenación, y pigmento verde, amarillo, marrón, rojo o negro de cerámica, esmaltes o cristales (Vásquez, 2003, pág. 39).

Los halogenuros de cadmio son solubles en agua. Se emplea en fotografía, grabado de metales, plateado por cadmio, como pigmentos, controladores en reactores nucleares, etc. El sulfato de cadmio, se aprovecha para el depósito electrolítico de Cd, Cu y Ni. El sulfuro de cadmio, es el pigmento amarillo-cadmio o amarillo brillante, usado en cerámica, pintura, pirotecnia, cristales coloreados, etc. También es útil para

la manufactura de pantallas fosforescentes, contadores de cetelleo, semiconductores, etc (Vásquez, 2003, pág. 39).

El único mineral que contiene sólo cadmio como metal es la greenockita (CdS), aunque es difícil de encontrar. No obstante, es frecuente que aparezcan pequeñas cantidades de su óxido revistiendo el silicato de Zn (hemimorfita) o su carbonato denominado octavita (CdCO<sub>3</sub>) revistiendo la blenda. También se ha determinado cadmio en arcillas pizarrosas con concentraciones de 0,3 mg/kg (Gutiérrez, 2015, pág. 7).

## 2. Historia del Cadmio

El cadmio fue descubierto en Alemania en 1817 por el químico Alemán Friedrich Stromeyer. Fue durante un examen mineralógico de algunas menas de zinc, este químico Alemán observaba el color amarillento de una muestra de Smithsonita (ZnCO<sub>3</sub>), que en su forma pura es de color blanco. El color amarillo de la muestra de ZnCO<sub>3</sub> puede ser explicado por la presencia de otro elemento, lo cual fue demostrado y confirmado por experimentos posteriores. Como resultado de una investigación prolongada fue posible obtener óxido de cadmio CdO y luego obtener cadmio metálico, después del descubrimiento del cadmio y determinadas propiedades valiosas del nuevo metal y sus compuestos, se llevó a cabo una investigación extensa de los depósitos de mineral de cadmio. Nuevos análisis de las menas muestran que en la naturaleza no se encuentran minerales de cadmio con alto contenido o concentración, sino que ellos se encuentran solamente en compañía del zinc en las minas polimetálicas del zinc con los óxidos y sulfuros (Soto, 2007, pág. 19).

En 1818 investigaciones realizadas por Karl Samuel Leberecht Hermann ratificaron la presencia de cadmio, al pasar una corriente de H<sub>2</sub>S en una solución de ZnS, produciéndose un precipitado amarillento de cadmio. A este metal le dieron diferentes nombres como: Melinum, Junonium y Klaprothium, fue su descubridor quien por el hecho de encontrarlo en la "Flor de zinc" (polvo de zinc), le puso el nombre de "Cadmia Foracun" quedando finalmente como cadmio; el cadmio es

diferente al zinc, en la naturaleza es 200 veces más abundante que el cadmio. El primer compuesto conocido de cadmio fue el CdS (Soto, 2007, pág. 19).

### 3. Propiedades Físicas

Las propiedades físicas y químicas del cadmio son similares a las del zinc (Nordberg, 2012).

El cadmio es un metal que cristaliza en pirámides hexagonales, vista a la luz (lámina delgada) es de color azul violeta, peso atómico 112.41 g/mol, punto de fusión 320.9°C y de ebullición 770°C. Potencial de  $\text{Cd}^{2+}$  -0.4 Voltios. Los vapores de cadmio son de color amarillo anaranjado, la densidad del cadmio 8.65 g/ml. El Cadmio forma diversos tipos de aleaciones con oro, platino y cobre en cantidades adecuadas. (Soto, 2007, pág. 21)

### 4. Propiedades Químicas

El cadmio se encuentra en el grupo 12 de la Tabla Periódica, número atómico 48 (Soto, 2007, pág. 22).

La química del cadmio es muy parecida a la del Zn y las diferencias son atribuidas al mayor tamaño del átomo de Cd y del ion  $\text{Cd}^{2+}$ . El cadmio es un metal reactivo y se disuelve en ácidos oxidantes y no oxidantes pero a diferencia del Zn, no se disuelve en álcali acuoso. En aire húmedo, el cadmio se oxida lentamente y cuando se calienta en el aire forma CdO. En caliente, Cd reacciona con los halógenos y con azufre (Housecroft & Sharpe, 2006, pág. 695).

Se conocen los cuatro haluros de Cd (II). La acción de HF sobre  $\text{CdCO}_3$  da  $\text{CdF}_2$  y la de HCl gas sobre Cd (720 K) da  $\text{CdCl}_2$ ;  $\text{CdBr}_2$  y  $\text{CdI}_2$  se forma por combinación directa de los elementos. El fluoruro es moderadamente soluble en agua, mientras que los otros haluros son fácilmente solubles dando disoluciones que contienen  $\text{Cd}^{2+}$  hidratado y una serie de halocomplejos, por ejemplo  $\text{CdI}_2$  se disuelve para dar una mezcla en equilibrio de  $[\text{Cd}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ ,  $[\text{Cd}(\text{H}_2\text{O})_5\text{I}]^+$ ,  $[\text{CdI}_3]^-$  y  $[\text{CdI}_4]^{2-}$ , mientras que  $\text{CdBr}_2$  acuoso 0.5 M contiene  $[\text{Cd}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ ,  $[\text{Cd}(\text{H}_2\text{O})_5\text{Br}]^+$ ,  $[\text{Cd}(\text{H}_2\text{O})_5\text{Br}_2]$ ,  $[\text{CdBr}_3]^-$  y  $[\text{CdBr}_4]^{2-}$ . A diferencia de  $\text{Zn}^{2+}$ , la estabilidad de los halo complejos de  $\text{Cd}^{2+}$  aumenta

de  $F^-$  a  $I^-$ , es decir,  $Cd^{2+}$  es un centro metálico más blando que  $Zn^{2+}$  (Housecroft & Sharpe, 2006, pág. 695).

El óxido de cadmio (II) (formado por calentamiento de Cd en  $O_2$  y con una variación de color de verde a negro) adopta una estructura de NaCl. Es insoluble en  $H_2O$  y álcalis pero se disuelve en ácidos, es decir, CdO es más básico que ZnO. La adición de álcali diluido a disoluciones acuosas de  $Cd^{2+}$  precipita  $Cd(OH)_2$  blanco y este se disuelve en álcali concentrado para dar  $[Cd(OH)_4]^{2-}$ . El CdS amarillo tiene importancia comercial como pigmento y como fosforo; CdSe y CdTe son semiconductores (Housecroft & Sharpe, 2006, pág. 695).

En disoluciones acuosas, está presente  $[Cd(H_2O)_6]^{2+}$  pero es bastante ácido, en disoluciones concentradas, hay  $[Cd_2(OH)]^{3+}$  hidratado. En  $NH_3$  acuoso, está presente  $[Cd(NH_3)_4]^{2+}$  tetraédrico pero a concentración elevada se forma  $[Cd(NH_3)_6]^{2+}$  (Housecroft & Sharpe, 2006, pág. 695).

#### 5. Usos del Cadmio.

El cadmio es un metal que tiene como característica ser resistente a la corrosión, por lo cual se utiliza en la electrodeposición en otros metales, especialmente el acero y el hierro. Es utilizado en partes de aviones, tornillos, tuercas de seguridad, pestillos y vehículos con el objetivo de protegerlos de la corrosión. Actualmente, sin embargo solo el 8% de todo el cadmio refinado se utiliza para el galvanizado y los recubrimientos. Los compuestos de cadmio se utilizan también como pigmentos y estabilizadores de plásticos (30% de su uso en países desarrollados) y en otros (3%). Las baterías pequeñas, portátiles y recargables de cadmio que se utilizan, por ejemplo, en los teléfonos móviles representan un uso del cadmio cada vez mayor (en 1994, en los países desarrollados el 55% de todo el cadmio se utilizó en la fabricación de baterías) (Nordberg, 2012, pág. 10).

Entre las sales de cadmio más utilizadas se pueden mencionar: estearato de cadmio, que se utiliza como estabilizador térmico en los plásticos de PVC (cloruro de polivinilo). El sulfuro de cadmio y el sulfoseleniuro de cadmio se utilizan como pigmentos amarillo y rojo en plásticos y tintes. El sulfuro de cadmio se utiliza también en células solares y fotográficas. El cloruro de cadmio se emplea como fungicida, componente de los baños galvanoplásticos, colorantes en pirotecnia, aditivo en las

soluciones de estañado y mordente en la tinción e impresión textiles. También se utiliza para la producción de determinadas películas fotográficas, para la fabricación de espejos especiales y para el recubrimiento de tubos electrónicos de vacío. El óxido de cadmio se utiliza como agente para galvanoplastia, materia prima para los estabilizadores térmicos de PVC y componente de las aleaciones de plata, pigmentos fosforescentes y semiconductores, así como para endurecimiento de cristalería o el vitrificado de cerámica (Nordberg, 2012, pág. 10).

## 6. Toxicidad del Cadmio

Las exposiciones a cadmio pueden ser por medio de los alimentos, agua y aire. Las plantas captan con mayor facilidad el cadmio que otros metales. Los factores que contribuyen a la presencia de cadmio en el suelo son precipitación desde el aire, agua que contienen cadmio usada para irrigación, y cadmio agregado a fertilizantes. Casi todo el cadmio transportado por el aire es respirable. Los cigarrillos constituyen una importante fuente no ocupacional de cadmio respirable. Un cigarrillo contiene de 1 a 2  $\mu\text{g}$  de cadmio, y 10% se inhala (Klaassen & Watkins, 2001, pág. 671).

El cadmio se bioacumula en los tejidos de los organismos de agua dulce. Factores de bioconcentración medios en macrófitas son inferiores a 50 y en peces, menores que 100. Para algunos moluscos se han registrado factores entre 2000 y 4000. Esa distribución y acumulación de cadmio en los tejidos es dependiente de la especie y vía de exposición (alimento o agua). En peces, una gran proporción del cadmio retenido se acumula en las branquias, hígado y riñones. Un ejemplo son las truchas de los ríos suecos contaminados con cadmio, las cuales presentan residuos en el hígado de 6 a 8 veces superiores cuando se comparan con peces de lugres exentos de contaminación con ese metal (Manson, 1991, pág. 351).

De los metales pesados el cadmio junto con el arsénico son los metales que presentan una mayor toxicidad y tendencia a la bioacumulación. El cadmio primero es transportado hacia el hígado por la sangre, luego se une a proteínas formando complejos que son transportados hacia los riñones acumulándose y causando daño en los mismos (ATSDR, 1999, pág. 672).

Toxicidad aguda (Dosis letal en ratón LD50 = 890 mg/kg) puede sobrevenir por ingestión de cantidades relativamente altas de cadmio, al consumir bebidas o alimentos contaminados. La inhalación de humos de cadmio u otros materiales calentados que contienen dicho elemento puede producir una neumonitis aguda y edema pulmonar de origen químico (Klaassen & Watkins, 2001, pág. 672).

Los principales efectos a largo plazo de la exposición baja a cadmio son enfermedad pulmonar obstructiva crónica y enfisema, así como enfermedad crónica de los túbulos renales. También puede haber efectos sobre el sistema cardiovascular y esquelético. La toxicidad para el aparato respiratorio es proporcional al de exposición y a la magnitud de la misma. La enfermedad pulmonar obstructiva sobreviene por bronquitis crónica, fibrosis progresiva de la parte baja de las vías respiratorias, y daño alveolar acompañante que da pie a enfisema (Klaassen & Watkins, 2001, pág. 672).

La toxicidad renal primaria del cadmio afecta la función de los túbulos proximales de los riñones, y se manifiesta por incremento del cadmio en la orina, proteinuria, aminoaciduria, glucosuria y decremento de la resorción de fosfato en los túbulos renales. Los cambios morfológicos son inespecíficos y constan de degeneración de las células de los túbulos en las etapas iniciales, con progresión hacia una reacción inflamatoria y fibrosis intersticiales (Klaassen & Watkins, 2001, pág. 672).

#### 7. Valores de Referencia de Cadmio para agua potable.

Las Normas internacionales para el agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 1958 no hicieron referencia al cadmio (OMS, 2006, pág. 258).

Las Normas internacionales de 1963 recomendaron una concentración máxima admisible de 0,01 mg/l, basándose en los posibles efectos perjudiciales para la salud. Este valor se mantuvo en las Normas internacionales de 1971 como límite superior provisional de concentración, basado en la concentración más baja que se pudo medir adecuadamente. La primera edición de las Guías para la calidad del agua potable, publicada en 1984, estableció un valor de referencia de 0,005 mg/l para el cadmio en agua de consumo. Posteriormente este valor se redujo a 0,003 mg/l en las Guías de 1993 basándose en la ingesta Semanal Tolerable Provisional (ISTP) establecida por el Joint Expert Committee on Food Additives (JECFA) (OMS, 2006, pág. 258).

La Comisión Guatemalteca de Normas, Ministerio de Economía COGUANOR establece como límite máximo permisible LMP de cadmio el valor de 0.003 mg/L para agua de consumo humano (COGUANOR, 2001).

8. Determinación de Cadmio por absorción atómica.

El método para la determinación de cadmio en flama aire / acetileno, se aplica al análisis de agua potable y de aguas residuales cuya concentración de cadmio se encuentre entre 0.05 mg/L y 1mg/L. Se pueden determinar concentraciones mayores previa dilución de la muestra (LEGISMEX, 2008, pág. 3).

Los siguientes iones no presentan interferencia en el método mientras su concentración no exceda los valores abajo especificados.

<b>Ion</b>	<b>Concentración</b>
<b>Sulfato</b>	10, 000 mg/L
<b>Cloruro</b>	10, 000 mg/L
<b>Fosfato</b>	10, 000 mg/L
<b>Sodio</b>	10, 000 mg/L
<b>Potasio</b>	10, 000 mg/L
<b>Magnesio</b>	10, 000 mg/L
<b>Calcio</b>	3, 000 mg/L
<b>Hierro</b>	3, 000 mg/L
<b>Cobre</b>	10, 000 mg/L
<b>Níquel</b>	3, 000 mg/L
<b>Cobalto</b>	10, 000 mg/L
<b>Plomo</b>	10, 000 mg/L
<b>Sílice</b>	1, 000 mg/L
<b>Titanio</b>	3, 000 mg/L

El contenido de sal total de una muestra debe ser inferior a 15 g/L y la conductividad eléctrica debe ser inferior a 20,000 mS/m (LEGISMEX, 2008, pág. 3).

## B. Electroquímica.

### 1. Generalidades

La electroquímica es una rama de la química dedicada al estudio de la interacción y correlación de los procesos químicos y eléctricos mediante las reacciones de óxido-reducción. Las reacciones electroquímicas son las de reducción-oxidación conocidas como redox, las cuales se basan en transferencia de electrones entre un conjunto de especies químicas, en las cuales se presentará una especie oxidante y una reductora, que a su vez alcanzarán una forma reducida y una forma oxidada respectivamente (Gilpavas, 2008, pág. 4).

Electrólisis es el nombre que recibe el proceso mediante el cual la energía eléctrica se emplea para producir cambios químicos; mediante una reacción redox no espontánea, donde se hace pasar una corriente eléctrica. Se lleva a cabo en un contenedor llamado celda electrolítica. La electrolisis es uno de los principales métodos químicos de separación. La principal ventaja del método electrolítico consiste en que no es necesario aumentar la temperatura para que la reacción tenga lugar, evitándose pérdidas energéticas y reacciones secundarias (Díaz, 2008, pág. 2).

### 2. Usos de la electroquímica.

El primer uso de la electricidad para el tratamiento de agua fue propuesto en el Reino Unido en 1889, a partir de este momento se fueron desarrollando diferentes técnicas electroquímicas y estas han sido investigadas como tratamiento de efluentes que se han establecido principalmente como tecnologías para la recuperación de metales, tratamiento de efluentes con presencia de metales pesados y tratamiento para agua de consumo (Gilpavas, 2008, pág. 4).

Industrialmente es uno de los procesos más empleados en diferentes áreas, como por ejemplo en la obtención de elementos a partir de compuestos (cloro, hidrógeno, oxígeno), la purificación de metales (el mineral metálico se disuelve en ácido, obteniéndose por electrólisis el metal puro) o la realización de recubrimientos metálicos protectores y/o con fines decorativos, como es el caso del niquelado (Díaz, 2008, pág. 3).

### 3. Principios de Electricidad

Los procesos electrofíticos implican variables eléctricas que es conveniente revisar:

- La corriente eléctrica ( $I$ ): es la rapidez del flujo de carga que pasa por un punto dado en un conductor eléctrico, que se origina por el movimiento de los electrones y es una medida de la cantidad de carga que pasa por un punto dado en la unidad de tiempo. Se mide en amperes (A).
- La diferencia de potencial o voltaje ( $V$ ): Cuando una corriente eléctrica fluye a través de un alambre conductor, se dice que lo hace porque existe una diferencia de potencial entre los dos extremos del alambre. La diferencia de potencial entre dos puntos se define como el trabajo efectuado, medido en Joules (J), por fuerzas eléctricas para mover una carga de un Coulomb desde el punto de mayor potencial hasta el punto de menor potencial. A la unidad con que se mide la diferencia de potencial se le llama Volts.
- La resistencia ( $R$ ): Es la oposición al flujo de carga eléctrica, y está presente en todos los elementos. Es una propiedad específica del material, que está en función de sus propiedades como son: el tamaño, forma y temperatura. Es independiente del voltaje y la corriente que pasa a través de ella. La unidad de medida es Ohm (Díaz, 2008, pág. 3).

Un aislante es un material que se resiste al flujo de carga a través de sí mismo. Un conductor eléctrico es un material por el cual puede transferirse carga fácilmente, la mayor parte de los metales son buenos conductores, existen diferentes tipos de conductores, clasificados por su naturaleza de conducción:

- Los conductores de primer orden son aquellos que poseen conductancia eléctrica, en los cuales los portadores de la carga son los electrones. Se caracterizan por tener una conducción sin transferencia substancial de masa.
- Los conductores de segundo orden poseen conductancia iónica o electrofítica, y los portadores de la carga son los iones. En este tipo de conductores se da una transferencia de masa asociada con la conductividad.
- Los conductores de tercer orden, llamados comúnmente semiconductores, poseen tanto conductancia iónica como eléctrica. Por lo general predomina el carácter eléctrico (Díaz, 2008, pág. 4).

#### 4. Celda electroquímica.

Los ánodos y cátodos son colocados en un tanque rectangular lleno de electrolito el cual se le conoce como una celda. Las celdas son típicamente hechas de polímeros de concreto resistentes al ácido, o hechos de concreto con insertos de polímeros los cuales están reforzados con fibra de vidrio (Quiroa, 2014, pág. 26).

Un electrodo es el componente de un circuito eléctrico que conecta el cableado del circuito a un medio conductor como un electrolito. El electrodo positivo es llamado ánodo y el electrodo negativo es llamado cátodo. El electrolito es la sustancia iónica que en solución se descompone al pasar la corriente eléctrica (Díaz, 2008, pág. 3).

a) Tipos de Celdas Electroquímicas. Los equilibrios de oxidación-reducción se estudian adecuadamente midiendo los potenciales de las celdas electroquímicas en las que participan las dos semireacciones que conforman el equilibrio. Por esta razón, es necesario considerar algunas características de las celdas (Skoog & West, 2000, pág. 412).

Una celda electroquímica consiste de dos conductores denominados electrodos, cada uno sumergido en una solución electrolítica.

Las celdas electroquímicas pueden ser galvánicas o electrolíticas (Skoog & West, 2000, pág. 412).

i. Celda galvánica. Las celdas galvánicas almacenan energía eléctrica. Por lo general, las baterías se hacen con varias celdas de este tipo conectadas en serie para producir un voltaje mayor que el que puede producir una celda sencilla. Las reacciones en los dos electrodos de estas celdas tienden a ocurrir espontáneamente y producen un flujo de electrones desde el ánodo hacia el cátodo (Skoog & West, 2000, pág. 412).

ii. Celda electrolítica. Para que una celda electrolítica funcione, necesita una fuente externa de energía eléctrica. Estas celdas se conectan a una fuente externa de voltaje (Skoog & West, 2000, pág. 412)

## 5. Proceso Electrolítico

El proceso electrolítico consiste en hacer pasar una corriente eléctrica a través de un electrolito, entre dos electrodos conductores denominados ánodo y cátodo. Donde los cambios ocurren en los electrodos (Díaz, 2008, pág. 7).

Cuando conectamos los electrodos con una fuente de energía (generador de corriente directa), el electrodo que se une al polo positivo del generador es el ánodo y el electrodo que se une al polo negativo del generador es el cátodo (Díaz, 2008, pág. 7).

Una reacción de electrólisis puede ser considerada como el conjunto de dos medias reacciones, una oxidación anódica y una reducción catódica (Díaz, 2008, pág. 7).

Las reacciones de oxidación y reducción ocurren simultáneamente, pero por separado, pues ocurren en diferentes puntos. La fuente no produce electrones, sólo los transporta de un lugar a otro, así los electrones que la fuente suministra al cátodo, provienen del ánodo. La función de la fuente es elevar la energía potencial de los electrones del cátodo. Estas reacciones de electrodo se llaman semi-reacciones. La naturaleza de las reacciones del electrodo depende de la diferencia de potencial o voltaje aplicado (Díaz, 2008, pág. 7).

## 6. Ley de Nernst

Es una relación cuantitativa que permite calcular la fuerza electromotriz de una celda para concentraciones de los iones distintas de la unidad. Esta ecuación, que se deduce por razonamientos termodinámicos, se escribe en la forma:

$$E = E^{\circ} - \left(\frac{0.059}{n}\right) \log Q$$

Donde  $E^{\circ}$  es la fuerza electromotriz o potencial normal de la correspondiente celda (que se obtiene a partir de los potenciales normales de los electrodos),  $n$  es el número de electrones transferidos (siempre y cuando el número de electrones en el proceso de oxidación sea el mismo que en el proceso de reducción) y  $Q$  es el cociente de reacción. Este cociente es el producto de las concentraciones de las especies activas del segundo miembro de la reacción química de oxidación- reducción, elevadas a sus

respectivos coeficientes estequiométricos, y su denominador es el producto análogo de las concentraciones de los reactivos (Quiroz, 2006, pág. 33).

Cuando la reacción que tiene lugar en una celda alcanza el estado de equilibrio, la fuerza electromotriz de la celda se hace cero, el cociente de reacción coincide con la constante de equilibrio, y la ecuación de Nernst es:

$$\text{Log } K = \frac{nE^\circ}{0.059}$$

Que permite calcular la constante de equilibrio a partir de la fuerza electromotriz normal (Quiroz, 2006, pág. 33).

## 7. Ley de Faraday

Constituye el principio fundamental de la electrólisis. Con la ecuación de esta ley se puede calcular la cantidad de metal que se ha corroído o depositado uniformemente sobre otro, mediante un proceso electroquímico durante cierto tiempo, y se expresa en los siguientes enunciados:

“La cantidad de cualquier elemento (radical o grupo de elementos) liberada ya sea en el cátodo o en el ánodo durante la electrólisis, es proporcional a la cantidad de electricidad que atraviesa la solución” (Díaz, 2008, pág. 9).

$$W = \frac{ITM}{nF}$$

W = cantidad de metal que se ha corroído o depositado.

I = Corriente

T = Tiempo que dura el proceso

M = masa atómica del metal

n = valencia del metal

F = Constante de Faraday

## 8. Aplicaciones de la electroquímica en remediación.

Las industrias de electrorecubrimientos, mineras, fotográficas, de baterías, de circuitos impresos y en general todas aquellas que en alguna parte de su proceso usan soluciones de algún ion metálico, los procedimientos electroquímicos son una herramienta que estas actividades pueden utilizar previo a la disposición de residuos generados hacia el drenaje (GIL, 2012, pág. 29).

La electroquímica aporta herramientas para estudiar, controlar, mitigar, o tratar residuos industriales, al contribuir con la aplicación y mejora de tecnologías existentes, así como la investigación, desarrollo e implementación de nuevas tecnologías. Su estudio y control está relacionado con las posibilidades que brinda el electroanálisis al emplear técnicas que permiten reducir, transformar o incluso eliminar residuos tóxicos, especialmente, la purificación de una solución de líquidos de proceso de metales pesados, como ocurre en las aguas residuales, donde es posible recuperar metales pesados en su forma más valiosa, debido a que muchos de los compuestos que conforman estas aguas son electroactivos, presentando la posibilidad de ser tratados a través de un proceso electroquímico (GIL, 2012, pág. 29).

Entre las aplicaciones de electroquímica se pueden mencionar los siguientes estudios:

### a) Estudios a nivel nacionales:

- MÉTODO ELECTROQUÍMICO DE ESTERIFICACIÓN DE SALES POTÁSICAS DE ÁCIDOS GRASOS CON ETANOL.

El estudio lo iniciaron diseñando una celda electroquímica adecuada para llevar a cabo la reacción de esterificación. Entre las condiciones que evaluaron se mencionan: sistema electroquímico en una fase, hidróxido de potasio, ácido sulfúrico como electrolito, etanol como solvente, electrodos de platino, un potencial de 30 voltios y una corriente de 0.1 amperios. La identificación la realizaron en dos procedimientos, en el primero procedimiento identificaron el

grupo funcional del éster en el producto de reacción por espectrometría de infrarrojo y en el segundo procedimiento identificaron el biodiesel por cromatografía de gases acoplado con espectrometría de masas. Obtuvieron rendimientos por arriba del 80%, el rendimiento más bajo fue de 83.01% y el más alto fue de 95.57% (Ríos, 2010).

- RECUPERACIÓN DE NÍQUEL A PARTIR DE MINERAL LATERÍTICO EMPLEANDO UN SISTEMA ELECTROQUÍMICO Y LIXIVIACIÓN CON CLORURO DE SODIO.

Este trabajo de investigación de electroquímica fue realizado a nivel nacional, con el fin de desarrollar una metodología para la recuperación de cloruro de níquel a partir de un mineral de tipo laterítico proveniente de una mena de El Estor Izabal, Guatemala. Donde diseñaron una celda electroquímica utilizando dos electrodos de platino, como electrolito utilizaron cloruro de sodio 100 g/L y 5 mL de ácido clorhídrico concentrado. Dentro del electrolito colocaron 50g del material pulverizado. El sistema lo dejaron trabajando por dos horas a un potencial de 14 Voltios, temperatura ambiente y a un pH de dos. Obtuvieron 19.98% como mayor porcentaje de recuperación de níquel (Quiroa, 2014).

b) Estudios a nivel internacional:

- TRATAMIENTO ELECTROQUIMICO PARA LA REMOCION DE METALES PESADOS EN RESIDUOS LIQUIDOS PELIGROSOS GENERADOS EN LOS LABORATORIOS.

Realizaron el procedimiento de electrodeposición para la remoción de cromo (VI) y plata (I) presentes en soluciones sintéticas y muestras aproximadas de residuos líquidos peligrosos, obtenidas aplicando las guías de los laboratorios del Departamento de Química de la Universidad del Cauca, utilizando una metodología sencilla y económica. Trabajaron con el equipo de prueba de jarras del laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, el cual se adaptó como celda electrolítica, capacidad de 2L, con electrodos de cobre como cátodo y zinc como ánodo, y un área total de deposición de 100 cm<sup>2</sup> aproximadamente. Las soluciones sintéticas trabajadas fueron de dicromato de potasio y nitrato de

plata en agua destilada a concentraciones máximas y mínimas de 150 mg/L y 50 mg/L respectivamente. Evaluaron tres parámetros importantes con el fin de identificar cómo influyen en el porcentaje de remoción, concentración, pH y tiempo, encontrándose que es posible alcanzar porcentajes de remoción para el cromo (VI) de 95%, ajustando el pH a 0.5 unidades, concentración de 150 mg/L y tiempo de electrólisis de 3 horas. Para la plata (I) el porcentaje de remoción es 29%, ajustando el pH a 2.0 unidades, concentración de 150 mg/L y tiempo de electrólisis de 30 min, siendo estos, los valores óptimos obtenidos de los parámetros para la electrodeposición (GIL, 2012).

- **REMOCIÓN DE METALES PESADOS PRESENTES EN AGUAS RESIDUALES A TRAVÉS DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN.**  
En el presente trabajo se encuentra una recopilación de la información necesaria para realizar un proceso de remoción de algunos metales por el proceso de electrocoagulación, donde presentan que por medio de la Galvanoplastia se puede obtener un 98.9% de remoción del cadmio (CAMARGO, 2015).
  
- **ELIMINACIÓN DEL ARSÉNICO (AS) POR ELECTROQUÍMICA, EN AGUAS SUBTERRÁNEAS. PARA CONSUMO HUMANO. CASO DE ESTUDIO "MUNICIPIO SAN SALVADOR HIDALGO".**  
En el presente trabajo explicaron como eliminaron arsénico de la captación de aguas subterráneas de tres pozos. El estudio fue realizado con sus respectivos muestreos, 6 muestras en total, llevándose tres muestras al laboratorio, para determinar arsénico por medio del método de absorción atómica. Las otras muestras fueron llevadas al laboratorio pero posterior a su determinación de arsénico, fueron sometidas al proceso de electroquímica. Las muestras sometidas a electroquímica presentaron una remoción considerable menor a 0.0025 mg/L valor que es el límite de detección de la Norma Mexicana NOM-127-SSA1-1994. (RODRIGUEZ, 2012).

- OPTIMIZACIÓN EN LA RECUPERACIÓN DEL CADMIO POR INHIBICIÓN DEL TALIO, NÍQUEL Y FIERRO EN LA SOLUCIÓN DE SULFATO DE CADMIO EN LA PLANTA DE CADMIO-REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA.

En este estudio se determinó la optimización de los procesos de refinación del cadmio, con el objetivo de hacerlo más rentable. Para lo cual utilizaron un reactivo alternativo en el proceso de refinación, en este caso la goma de origen animal en remplazo de la gelatina que es un producto importado y de alto costo. Con este reemplazo pudieron comprobar el efecto inhibitor de los elementos talio, níquel y fierro, obteniendo un mayor porcentaje de recuperación de cadmio y economizando el uso de reactivos como polvo de zinc y permanganato que también se utilizan en la purificación del cadmio. Las pruebas las realizaron simulando las condiciones de operación de la Refinería de Zinc de Cajamarquilla ubicada en Perú, esta es una empresa productora de zinc y cadmio a nivel nacional. La diferencia en precios en el remplazo de la gelatina por la goma es de unos 60 dólares mensuales (Soto, 2007).

## 9. Electrodo

Como electrodos generalmente se utilizan barras de metal, donde el grado de calidad y pureza de los mismos debe ser óptimo. De no ser así, la solución se verá rápidamente contaminada.

La superficie de los ánodos y de los cátodos deben guardar una relación de por lo menos 1:1, o ligeramente superior a favor de la superficie anódica que pueden llegar a ser de hasta 2:1. Si los ánodos son pequeños se logra obtener una distribución de corriente adecuada del ánodo al cátodo.

En el caso de que la distancia entre el ánodo y el cátodo no sea uniforme, el proceso ofrecerá más resistencia en los sitios más alejados por tanto, circulara la corriente con desigualdad, depositando el metal de forma irregular. Estas irregularidades se presentan con mayor frecuencia cuando la distancia entre los electrodos es pequeña, por lo que la distancia entre electrodos se tiene que aumentar cuando los objetos son voluminosos o presentan mucha diferencia en su geometría (GIL, 2012, pág. 32)

#### IV. JUSTIFICACION

Debido a que el cadmio es un metal pesado, altamente tóxico y que en Guatemala existen varias industrias como: PlastiHogar, Plásticos San José S.A., Bimbo, GUARD, Foragro, Disagro, Ecotermo, INLASA, BIOLAB, FQB e industria minera, que pueden generar cadmio en disolución entre sus desechos (debido a que en sus procesos de producción utilizan este metal, como una fuente secundaria), es de suma importancia conocer y aplicar técnicas para su eliminación o reducción la concentración de cadmio de las disoluciones acuosas, para su recuperación y reutilización a nivel industrial.

El cadmio no cuenta con estudios a nivel nacional donde se puedan aplicar métodos electroquímicos para reducir su concentración o eliminación en muestras en solución. Con la presente investigación se realizará un diseño de una celda electroquímica con la que se pueda reducir la concentración de cadmio en disolución acuosa, haciéndolo precipitar o depositándolo en un electrodo de acero inoxidable o platino, este diseño permitirá reducir y evitar la dispersión de este metal en el medio ambiente y poderlo reutilizar en procesos de interés.

Este estudio permitió determinar las condiciones óptimas de una celda electroquímica para que las industrias que utilizan cadmio en sus procesos, puedan aplicar un sistema electroquímico eficiente que permitirá reducir la concentración de este metal en sus procesos o desechos industriales.

## V. OBJETIVOS

### A. Objetivos generales:

Diseñar una celda electroquímica para la reducción de la concentración de cadmio en disolución acuosa.

### B. Objetivos específicos:

Determinar las condiciones óptimas de una celda electroquímica que permita reducir el mayor contenido de cadmio en solución en base a su potencial de electrodo.

Comparar la reducción de cadmio con los electrodos de referencia de platino, grafito y de acero inoxidable.

Conocer el porcentaje de reducción de cadmio en solución por espectroscopia de Absorción Atómica.

## **VI. HIPOTESIS**

La presente investigación no contiene hipótesis, debido a que se encontrará de forma experimental las condiciones adecuadas de potenciales y electrodos, para la máxima reducción de cadmio en solución.

## VII. MATERIALES Y METODOS

Los materiales y métodos a utilizar en el estudio serán los siguientes:

### A. Universo:

Solución estándar de cadmio de 1000 ppm.

### B. Muestra:

500 ml de solución de cadmio a 0.5 ppm.

### C. Materiales:

#### 1. Equipo de Laboratorio:

- Balanza Analítica Mettler Toledo
- Espectrofotómetro de absorción atómica: Marca: Perkin Elmer, Modelo: 3110.
- Estufas con agitación magnética VWRbrand
- Horno VWRbrand
- Pipetas volumétricas automáticas Eppendorf
- Fuente de Poder Long Weí, estabilidad de voltaje de  $\pm 2$  mV

#### 2. Reactivos

- 100ml de estándar de cadmio a 1000 ppm (grado analítico)
- Sulfato de sodio (grado analítico)
- 500 mililitros de ácido clorhídrico concentrado (grado reactivo)
- 500 mililitros de ácido nítrico concentrado (grado reactivo)

#### 3. Herramientas y materiales

- Lagarto con alambre para pasar corriente
- Electrodo de Platino y Acero Inoxidable.
- Agitador magnético
- Bulbos para pipeta

- Gradillas
- Pinzas
- Puntas de pipeta volumétrica
- Termómetro

#### 4. Cristalería

- Agitador de vidrio
- Balón aforado de 25, 50 y 100 ml
- Beakers de 250, 500 ml y 1 L
- Cápsulas de porcelana
- Matraces Erlenmeyer de 250 ml
- Pipetas volumétricas de 1, 2, 4, 6, 10 y 100 ml
- Probetas de 10, 50, 250 ml
- Desecadora

#### D. Metodología a utilizar en el estudio:

##### 1. Diseño de la investigación

La presente investigación es experimental donde se realizó el diseño de una celda electroquímica para la reducción de la concentración de cadmio en disolución acuosa; la muestra se generó con una concentración de cadmio de 0.5ppm a partir de estándar de cadmio de 1000ppm y 0.5 mol/L de sulfato de sodio. La celda electroquímica se fabricó en un beacker de 50 mililitros sumergiendo dos electrodos (cátodo y ánodo) conectados a una fuente de poder con estabilidad de voltaje de  $\pm 2$  mV que genero los diferentes potenciales a los cuales se sometieron las muestras a temperatura ambiente por 30 minutos cada una. Se realizaron nueve ensayos variando el potencial y los electrodos, el primero de 2 V, el segundo de 4 V, el tercero de 6 V, el cuarto de 2 V, el quinto de 4 V, el sexto de 6 V, el séptimo de 2 V, el octavo de 4 V, y el noveno de 6 V, del primero al tercero se utilizarán electrodos de grafito tanto en el cátodo como en el ánodo, del cuarto al sexto se utilizaron electrodos de platino tanto en el cátodo como en el ánodo y del séptimo al noveno se utilizaron electrodos de acero inoxidable tanto en el cátodo como en el ánodo. Cada ensayo se

realizó por triplicado. Para evaluar la reducción de la concentración de cadmio en todas sus formas oxidadas en disolución, se utilizó la metodología de determinación de cadmio por espectrofotómetro de absorción atómica de flama.

Los resultados:

A: voltajes:

<b>a<sub>1</sub></b>	<b>a<sub>2</sub></b>	<b>a<sub>3</sub></b>
<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>

B: Electrodo:

<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>
<b>Grafito</b>	platino	Acero inoxidable

	<b>a<sub>1</sub></b>	<b>a<sub>2</sub></b>	<b>a<sub>3</sub></b>
<b>b<sub>1</sub></b>	a <sub>1</sub> b <sub>1</sub>	a <sub>2</sub> b <sub>1</sub>	a <sub>3</sub> b <sub>1</sub>
<b>b<sub>2</sub></b>	a <sub>2</sub> b <sub>2</sub>	a <sub>2</sub> b <sub>2</sub>	a <sub>3</sub> b <sub>2</sub>

- Diseño factorial
- Análisis de Factores  
 $y_{ij} = T_o + A_i + B_j + AB + e$
- Análisis de Varianza

<b>Fuentes de variación</b>	<b>Suma cuadrados</b>	<b>gl</b>	<b>Cuadro medio</b>	<b>F*</b>

Si sale significativo, entonces recalculamos una prueba post ANDEVA de diferencia mínima significativa de Tukey.

## 2. Procedimiento

**a) Preparación del Electrolito.** Pesar aproximadamente 142.04 g de sulfato de sodio en un balón de 2L y llevar a volumen con agua destilada.

**b) Preparación de la Muestra a 0.5 ppm de cadmio.** Agregar 1 ml de estándar de cadmio de 1000 ppm en un balón de 2L y llevar a volumen con la solución de electrolito.

**c) Preparación de la celda electroquímica:**

- Dentro del beaker de 100 ml conteniendo 50 ml de la muestra, se sumergen los dos electrodos de acero inoxidable. Un electrodo está conectado a un lagarto el cual viene de un alambre conectado al polo negativo de la fuente de poder. El otro electrodo va unido a un lagarto conectado en el extremo positivo de la fuente de poder. Ambos electrodos van sujetos a pinzas universales. Repetir el mismo procedimiento con los electrodos de grafito y platino.
- Se enciende la fuente de poder, se toma la primera muestra de 50 ml (0.5 ppm de cadmio y 0.5 Mol/L de sulfato de potasio) y se fija al potenciales deseado, para iniciar se coloca el potencial de 2V se deja reaccionar por 30 minutos y se toma la segunda muestra, luego se repite el procedimiento con el potencial de 4V y el de 6V, este proceso se lleva a cabo en una estufa con agitación a temperatura ambiente. Las muestras son analizadas por absorción atómica.

**d) Determinación de cadmio:**

**Solución madre de Cadmio I, (cd) = 1, 000 mg/L.** Se disuelve 1,000g  $\pm$  0.002g de cadmio en 10 mL de agua y 10 mL de ácido nítrico concentrado en un vaso de precipitado y luego trasvasar a un balón de 1 L, aforar con agua destilada. Se almacena la solución en recipiente de polietileno o de vidrio de boro silicato. La solución es estable durante un año.

También se puede utilizar una solución patrón comercial cuya concentración sea 1,000 g/L  $\pm$  0.002 g/L de cadmio (LEGISMEX, 2008).

**Solución patrón de cadmio I, (Cd) = 10 mg/L.** Se transfiere con una pipeta de 10 mL de la solución madre de Cadmio a un balón de 1 L, se añaden 10 mL de ácido nítrico concentrado y se afora con agua. Se almacena la solución en recipiente de polietileno o de vidrio boro-silicato. La solución es estable durante un mes a temperatura ambiente (LEGISMEX, 2008).

**Preparación de disoluciones para curva de calibración de cadmio.** Se prepara un mínimo de cinco disolución de calibración para curva según las concentraciones esperadas de cadmio.

Ejemplo, para un rango de trabajo comprendido entre 0.05 mg/L y 1.0 g/L.

Se pipetea 1.0 mL; 2.0 mL; 3.0 mL; 4.0 mL; 5.0 mL y 6.0 mL de la solución patrón de cadmio en distintos balones de 100 mL. Se añade 1 mL de ácido nítrico concentrado a cada una de dichas disoluciones. Se afora y se homogeniza.

Las disoluciones preparadas contienen 0.1 mg/L; 0.2 mg/L; 0.3 mg/L; 0.4 mg/L; 0.5 mg/L y 0.6 mg/L de cadmio, respectivamente (LEGISMEX, 2008).

**Colocar las condiciones y parámetros Instrumentales siguientes:**

Elemento	Cadmio
Fuente	Lámpara Cátodo Hueco de Cd
Longitud de onda	(228,7± 0,1) nm
Corriente	(4 a 8) mA
Slit	0,7 width/high
Energía	(51 a 56) mA
Gas	Acetileno
Oxidante	Oxigeno
Presión Residual de acetileno en cilindro.	5x10 <sup>5</sup> pascales.

**Medición de Curva y Muestras en el equipo de Absorción atómica.** Ingresar al equipo las concentraciones de la curva de calibración y el número de muestras analizar, dejar calentado la lámpara y llama por 10 minutos.

Medir la curva de calibración y muestras, utilizando como blanco agua destilada.

Con los resultados de la curva de calibración graficar una recta colocando en el eje X la concentración y en el eje Y las absorbancias. Determinar la ecuación de la recta y con esta calcular la concentración de las muestras (LEGISMEX, 2008).

## VIII. RESULTADOS

Cuadro No. 1. Diseño Factorial. En este cuadro se presentan los porcentajes de reducción de cadmio con los electrodos de platino y grafito.

	<b>2 Voltios</b>	<b>4 Voltios</b>	<b>6 Voltios</b>
<b>Electrodo de grafito</b>	14.48	48.50	36.69
<b>Electrodo de grafito</b>	15.30	50.33	38.76
<b>Electrodo de grafito</b>	14.75	53.98	34.88
<b>Electrodo de grafito</b>	16.12	53.72	38.50
<b>Electrodo de grafito</b>	15.30	55.80	39.28
<b>Electrodo de grafito</b>	15.57	56.06	39.02
<b>Electrodo de platino</b>	0.00	0.00	11.37
<b>Electrodo de platino</b>	0.00	0.00	10.66
<b>Electrodo de platino</b>	0.00	0.00	11.37
<b>Electrodo de platino</b>	0.00	0.00	12.44
<b>Electrodo de platino</b>	0.00	0.00	12.08
<b>Electrodo de platino</b>	0.00	0.00	12.79
<b>Electrodo de acero inoxidable</b>	0.00	0.00	0.00
<b>Electrodo de acero inoxidable</b>	0.00	0.00	0.00
<b>Electrodo de acero inoxidable</b>	0.00	0.00	0.00
<b>Electrodo de acero inoxidable</b>	0.00	0.00	0.00
<b>Electrodo de acero inoxidable</b>	0.00	0.00	0.00
<b>Electrodo de acero inoxidable</b>	0.00	0.00	0.00

Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia. Análisis de Datos en STATA 2012.

Cuadro No. 2. Análisis de varianza de los 6 grupos de celdas con los electrodos de grafito y platino.

<b>No. de grupo</b>	<b>Grupos</b>	<b>Numero de muestras</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
<b>1</b>	Grafito 2 Voltios	6	91.5300546	15.2550091	0.34090796
<b>2</b>	Grafito 4 Voltios	6	318.391614	53.065269	9.21363934
<b>3</b>	Grafito 6 Voltios	6	227.131783	37.8552972	2.95788848
<b>4</b>	Platino 2 Voltios	6	0	0	0
<b>5</b>	Platino 4 Voltios	6	0	0	0
<b>6</b>	Platino 6 Voltios	6	70.7178394	11.7863066	0.62721557

Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia. Análisis de Datos en STATA 2012. Observación: no se toman en cuenta los valores con los electrodos de acero inoxidable debido a que ninguno redujo la concentración de cadmio.

Cuadro No.3 Análisis de Varianza de todos los grupos.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
<b>Entre grupos</b>	13808.4662	5	2761.69323	1261.0806	0.000	2.53355455
<b>Dentro de los grupos</b>	65.6982567	30	2.18994189			
<b>Total</b>	13874.1644	35				

Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia. Análisis de Datos en STATA 2012.

Cuadro No. 4. Prueba de Tukey.

Análisis	Resultado
<b>Diferencia Honesta Significativa (HSD)</b>	2.5976
<b>Multiplicador</b>	4.30
<b>Cuadrado del Error medio (MSe)</b>	2.19
<b>Tamaño de la muestra por grupos (n)</b>	6

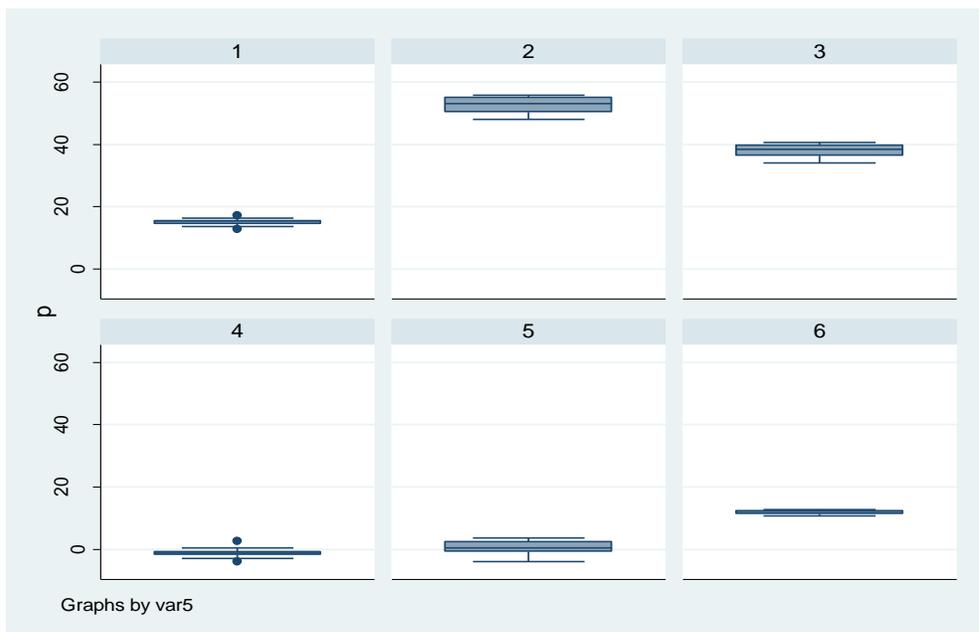
Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia. Análisis de Datos en STATA 2012.

Cuadro No. 5. Relación entre grupos utilizando la prueba de Turkey

Relación entre Grupos	Contraste	Intervalo de confianza al 95%
<b>2 versus 1</b>	37.493	35.21 a 40.41
<b>3 versus 1</b>	22.885	20.00 a 25.20
<b>4 versus 1</b>	-16.354	-17.85 a -12.66
<b>5 versus 1</b>	-14.713	-17.85 a -12.66
<b>6 versus 1</b>	-3.302	-6.07 a -0.87
<b>3 versus 2</b>	-14.608	-17.81 a -12.61
<b>4 versus 2</b>	-53.847	-55.66 a -50.47
<b>5 versus 2</b>	-52.206	-55.66 a -50.47
<b>6 versus 2</b>	-40.795	-43.88 a -38.68
<b>4 versus 3</b>	-39.239	-40.45 a -35.26
<b>5 versus 3</b>	-37.598	-40.45 a -35.26
<b>6 versus 3</b>	-26.187	-28.67 a -23.47
<b>5 versus 4</b>	1.641	-2.60 a 2.60
<b>6 versus 4</b>	13.052	9.19 a 14.38
<b>6 versus 5</b>	11.411	9.19 a 14.38

Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia. Análisis de Datos en STATA 2012.

Grafica No. 1. Relación entre los 6 grupos según porcentaje de reducción de cadmio.



Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia. Análisis de Datos en STATA 2012.

## IX. DISCUSIÓN

Se realizó el diseño de una celda electroquímica para la reducción de cadmio en solución acuosa. En este estudio se prepararon 56 muestras (54 muestras fueron sometidas a electroquímica y 2 muestras control no fueron sometidas a electroquímica, ver esquema uno), las muestras se prepararon tomando 50 mililitros de una solución que tiene presente sulfato de cobre con una concentración de 0.5 mol/L y una concentración de 0.5 partes por millón de cadmio. El sulfato de sodio se utiliza como electrolito para que se produzca corriente en el medio.

Las muestras preparadas fueron sometidas a electroquímica durante 30 minutos, utilizando tres voltajes (2 voltios, 4 voltios y 6 voltios) y tres tipos de electrodos (acero inoxidable, platino y grafito). Para el diseño electroquímico las muestras fueron colocadas en beacker de 100 mililitros, con sus respectivos electrodos y estos se conectaron a una fuente de poder con estabilidad de voltaje de  $\pm 2$  mV, para poder colocar el potencial deseado.

Después de haber tratado las muestras por medio electroquímico, se determinaron las concentraciones de cadmio en las diferentes muestras. Para la determinación de cadmio se realizó una primera curva de calibración (ver cuadro No.6 y grafica No. 2), obteniendo un coeficiente de correlación de 0.9963 (ver cuadro No.7), con esta curva se relacionaron las muestras tratadas con electrodos de acero inoxidable y platino, a los potenciales de 2 voltios, 4 voltios y 6 voltios. Con la segunda curva de calibración (ver cuadro No.14 y grafica No. 3), obteniendo un coeficiente de correlación de 0.9992 (ver cuadros No.15), con esta curva se relacionaron las muestras tratadas con electrodos de acero inoxidable y platino, a los potenciales de 2 voltios, 4 voltios y 6 voltios (DiRienzo, 2009).

Las dos curvas de calibración son aceptadas debido a que sus coeficientes de correlación se encuentran dentro del rango permitido de 0.995 a 1. Con las señales obtenidas de las diferentes muestras se procedió a calcular la concentración para lo cual se utilizó la ecuación de la recta según la pendiente e intercepto encontradas con las curvas de calibración (DiRienzo, 2009).

Se observó una diferencia en el porcentaje de reducción en las muestras que fueron tratadas con los electrodos de platino a 6 voltios (ver cuadro No. 13), los electrodos de grafito a 2 voltios (ver cuadro No. 16), 4 voltios (ver cuadro No. 17) y 6 voltios (ver cuadro

No. 18), descartando las muestras tratadas con los electrodos de acero inoxidable debido a que ninguno presento reducción en la concentración de cadmio en relación al control.

Las muestras que presentaron reducción electroquímica de cadmio en su concentración fue por el cambio de potencial (2V, 4V y 6V) producido entre los diferentes electrodos que cambio el número de valencia del cadmio de todas sus formas oxidadas a su estado elemental. El cadmio con valencia de cero (0) forma un precipitado de color blanco azulado que es insoluble en solución, lo que no permite su determinación por espectroscopia de absorción atómica. Se observó la formación de burbujas debido a la liberación de hidrógeno por la hidrólisis del agua, siendo proporcional al potencial utilizado. Por lo cual es importante no utilizar potenciales arriba de los 6 Voltios (Díaz, 2008).

Con los porcentajes de reducción electroquímica de cadmio obtenidos, se realizó un diseño factorial donde se colocaron según sus electrodos de grafito y platino y los potenciales (2 voltios, 4 voltios y 6 voltios) utilizados (ver cuadro No. 1), formando seis grupos a los cuales se les determinó el promedio y la varianza (ver cuadro No. 2). Posteriormente se realizó un análisis de varianza entre grupos obteniendo un valor de probabilidad por debajo del 0.05% del nivel de significancia (ver cuadro No. 3) lo que nos indica que si hay diferencia significativa entre los grupos, por lo cual se procedió a realizar una prueba post ANDEVA utilizando la prueba de Tukey, para determinar la diferencia honesta significativa (HSD) dando un valor de 1.8481 (ver cuadro No. 4). De igual forma se determinó la diferencias entre las medias de los grupos (contraste), para saber si hay diferencia entre grupos se comparó el contraste con el HSD observando que todos los valores arriba del valor absoluto del HSD tienen una diferencia significativa. Se determinó que el contraste del grupo numero 4 versus número 5 no superan el valor de HSD lo que nos indica que estos dos grupos son iguales, al determinar los porcentajes de reducción de estos dos grupos observamos que si se cumple debido a que sus porcentajes de reducción de cadmio son cero (DiRienzo, 2009).

Al comparar todos los contrastes con el HSD se observó que el grupo dos presenta los valores más altos, lo que nos indica que tiene mayor significancia entre los grupos, esto se puede ver en la gráfica No.1, ya que el grupo 2 presento el mayor porcentaje de reducción en la concentración del cadmio. En esta investigación se determinó que cuatro voltios y los electrodos de grafito presentan las condiciones óptimos para la reducción en la concentración del cadmio en solución acuosa.

El factor no permitió la reducción en la concentración de cadmio con los electrodos de acero inoxidable fue que un electrodo se desgastó y el otro se hizo más grueso (ver imagen No. 3) debido a que estos tienen una composición de hierro, zinc y otros metales, estos realizaron una electro deposición entre electrodos lo que no permitió la reducción del ion cadmio, actuando este ion como electrolito quedando inerte en el medio, esto no se observó con los electrodos de grafito y platino (Díaz, 2008).

Según los resultados de los porcentajes de reducción en la concentración de cadmio, se determinó que los electrodos de grafito fueron los más óptimos en comparación a los electrodos de acero inoxidable y platino debido a que estos contaban con una área superficial mayor a los otros electrodos lo que les permitió tener mayor interacción con los iones de cadmio, otro factor pudo ser la composición del electrodo, que esto no permitió que hubiera electro posición entre ellos (Díaz, 2008).

No se alcanzó la reducción por arriba del 60% esto se pudo deber a que cuando se realizó el tratamiento electroquímico se observó la hidrólisis del agua donde hubo una competencia entre hidrolizar el agua y reducir el ion cadmio. Otro factor que no pudo permitir la reducción total fue la distancia entre los electrodos, para lo que se recomienda en próximas investigaciones buscar la distancia óptima entre los electrodos, para tratar de contrarrestar este efecto y permitir que el ion cadmio fuera expuesto a los electrodos utilizados en el diseño de una celda electroquímica se le colocó una agitación constante (Díaz, 2008).

## **X. CONCLUSIONES**

En el diseño de una celda electroquímica para la reducción de la concentración de cadmio los electrodos de grafito a un potencial de 4 voltios son los más óptimos para el diseño de una celda electroquímica para la reducción de la concentración de cadmio en solución debido a que fueron los que presentaron el mayor porcentaje de reducción siendo este de 53.07% con un 95% de confianza.

Los electrodos de grafito presentaron el mayor porcentaje de reducción de la concentración de cadmio en relación de los otros electrodos debido a que estos no interaccionaron entre ellos y tienen mayor área superficial, lo que les permite tener mayor interacción con el ion cadmio.

Los electrodos de acero inoxidable utilizados en este diseño de celda electroquímica presentaron un porcentaje de reducción de cero debido a que ocurrió electro posición entre ellos, motivo por el cual no fueron tomados en cuenta en el análisis estadístico.

## **XI. RECOMENDACIONES**

Se recomienda que para análisis posteriores determinar el tiempo óptimo para la reducción de cadmio en solución.

Evaluar los cambios en la reducción de la concentración al variar la distancia entre electrodos en una celda electroquímica.

Aplicar este diseño electroquímico utilizando otro tipo de electrolitos (sulfato de potasio cloruro de sodio etc.) y determinar qué cambios se observan en la reducción de cadmio.

## XII. REFERENCIAS

- ATSDR, A. p. (1999). Agencia para Sustancias Tóxicas y registro de Enfermedades (ATSDR). Recuperado el 2 de agosto de 2016, de Agencia para Sustancias Tóxicas y registro de Enfermedades (ATSDR): [www.atsdr.cdc.gov](http://www.atsdr.cdc.gov)
- Baird, C. (2001). Química Ambiental. Colombia, Bogotá: Reverté.
- CAMARGO, J. (2015). REMOCIÓN DE METALES PESADOS PRESENTES EN AGUAS RESIDUALES A TRAVÉS DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN (tesis). BOGOTÁ.
- Chang, R. (2010). Química. Mexico: Mc Graw Hill.
- COGUANOR, L. C. (2001). Agua para Consumo Humano. Guatemala: COGUANOR. Recuperado el 2 de agosto de 2016, COGUANOR: [www.coguanor.gob.gt](http://www.coguanor.gob.gt)
- Díaz, F. (2008). PRINCIPIOS DE ELECTRODEPOSICION. UNAM, 42.
- DiRienzo, J. (2009). Estadística para la Ciencias Agropecuarias, Editorial Brujas, séptima edición, Argentina, 211 - 233.
- GIL, J. (2012). TRATAMIENTO ELECTROQUÍMICO PARA LA REMOCION DE METALES PESADOS EN RESIDUOS LIQUIDOS PELIGROSOS GENERADOS EN LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA (Tesis). SANTIAGO DE CALI, Facultad de Ingeniería.
- Gilpavas, D. (2008). APLICACIÓN DE LA ELECTROQUÍMICA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (Tesis). Medellín: EAFIT.
- Gutiérrez, S. (2015). "Estudio de la Bioadsorción de Cadmio y Plomo con Biomasa de *Serratia marcescens* M8a-2T, a Nivel de Laboratorio." (Tesis). UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS , Peru. Lima: Facultad de Ciencias Biológicas.
- Harris, D. (2008). Análisis Químico Cuantitativo 2a. ed. México, D.F.: Reverté.
- Housecroft, C., & Sharpe, a. (2006). *Química Inorgánica* . Madrid: PEARSON EDUCACIÓN S.A.

- INEN, I. E. (1982). DETERMINACIÓN DE CADMIO ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA. Ecuador. Quito: INEN.
- JECFA. (2000). Resumen y conclusiones de la 55av. reunion Ginebra Suiza. Suiza. Ginebra: Comité Mixto FAO/OMS de expertos en Aditivos Alimentarios. Recuperado el 2 de agosto de 2016, JECFA:  
[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq3\\_es\\_12.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_12.pdf)
- Klaassen, C., & Watkins, J. (2001). Manual de toxicología: la ciencia básica de los tóxicos. Nueva York: McGraw-Hill Interamericana.
- LEGISMEX. (2008). ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE METALES POR ABSORCIÓN ATÓMICA EN AGUAS NATURALES, POTABLES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS.- MÉTODO DE PRUEBA- (ESTA PARTE CANCELA LO CORRESPONDIENTE AL Cd DE LA NMX-. Mexico D.F., Mexico: PROY-NMX-AA-051/1-SCFI-2008.
- Manson, C. (1991). Biology of freshwater pollution (segunda ed.). New York, USA: John Willey and Sons.
- Marín, R. (2003). Físicoquímica y Microbiología de los medios acuáticos. Tratamiento y control de calidad de Aguas. España: Díaz Santos, S.A.
- Nordberg, G. (2012). Metales: propiedades químicas y toxicidad. D - INSHT (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo), 78.
- OMS, O. M. (2003). Cadmium in drinking-water. Suiza. Ginebra: Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable. Recuperado el 2 de agosto de 2016, OMS:  
[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq3\\_es\\_12.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_12.pdf)
- Quiroa, W. (2014). RECUPERACIÓN DE NÍQUEL A PARTIR DE MINERAL LATERÍTICO EMPLEANDO UN SISTEMA ELECTROQUÍMICO Y LIXIVIACIÓN CON CLORURO DE SODIO (Tesis). UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA. GUATEMALA: FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA.

- Quiroz, R. (2006). *“DETERMINACIÓN ELECTROQUÍMICA DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN PARA Gd(III)”*. Mexico: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
  
- Ríos, C. (2010). METODO ELECTROQUIMICO DE ESTERIFICACION DE SALES POTASICAS DE ACIDOS GRASOS CON ETANOL (Tesis). UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA. GUATEMALA: FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA.
  
- RODRIGUEZ, J. (2012). Eliminación del Arsénico (As) por Electroquímica, en Aguas Subterráneas. para CONSUMO HUMANO. CASO DE ESTUDIO "Municipio San Salvador Hidalgo" (Tesis). MEXICO.
  
- Skoog, D., & West, D. (2000). Química Analítica. Mexico: McGraw-Hill.
  
- Soto, O. (2007). OPTIMIZACION EN LA RECUPERACION DEL CADMIO POR INHIBICION DEL TALIO, NIQUEL Y FIERRO EN SOLUCION DE SULFATO DE CADMIO. TESIS, LIMA.
  
- Vásquez, I. (2003). DETERMINACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y COBRE EN FUENTES DE AGUA DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA POR VOLTAMPEROMETRÍA DIFERENCIAL DE REDISOLUCIÓN ANÓDICA (Tesis). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala: Facultad de Ingeniería.

### XIII. ANEXOS

Cuadro 6. Valores de concentración y absorbancia del estándar de cadmio utilizado para los electrodos de acero inoxidable y platino.

Concentración	Señal
0.1	0.0180
0.2	0.0364
0.3	0.0554
0.4	0.0677
0.5	0.0887
0.6	0.1087

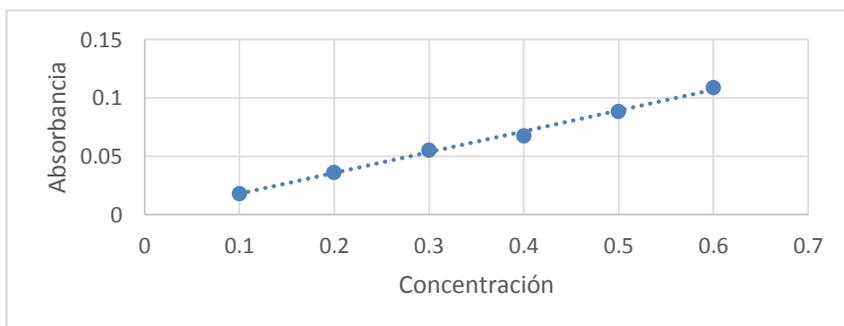
Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia.

Cuadro 7. Regresión lineal del estándar de cadmio utilizado para los electrodos de acero inoxidable y platino.

Datos	Resultado
Coeficiente de correlación	0.9963
Ecuación	$y = 0.1779x + 0.0002$

Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia.

Grafica 2. Curva de Regresión lineal de Cadmio en Absorción Atómica, utilizada para los electrodos de acero inoxidable y platino



Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia. Análisis de Datos en Excel 2013.

Cuadro 8. Porcentaje de reducción de cadmio de las muestras tratadas con un potencial de 4 Voltios con electrodos de Acero inoxidable.

Muestra	Señal	Concentración de cadmio	concentración reducida de cadmio	Porcentaje de reducción de cadmio.	Media del Porcentaje de Reducción	Porcentaje Reportado
<b>control 1</b>	0.094	0.5273	0	0	0	0
<b>control 1</b>	0.093	0.5216	0	0		
<b>control 1</b>	0.094	0.5273	0	0		
<b>muestra 1A</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00	-0.36	0
<b>muestra 1A</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-1.07		
<b>muestra 1A</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00		
<b>muestra 1B</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00	-0.36	0
<b>muestra 1B</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-1.07		
<b>muestra 1B</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00		
<b>muestra 2A</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-1.07	-0.71	0
<b>muestra 2A</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00		
<b>muestra 2A</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-1.07		
<b>muestra 2B</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00	0.00	0
<b>muestra 2B</b>	0.093	0.5216	0.0056	1.05		
<b>muestra 2B</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-1.07		
<b>muestra 2A</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00	-0.36	0
<b>muestra 2A</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-1.07		
<b>muestra 2A</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00		
<b>muestra 2B</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-1.07	-0.71	0
<b>muestra 2B</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00		
<b>muestra 2B</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-1.05		

Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia. Análisis de Datos en Excel 2013.

Cuadro 9. Porcentaje de reducción de cadmio de las muestras tratadas con un potencial de 4 Voltios con electrodos de Acero inoxidable.

Muestra	Señal	Concentración de cadmio	concentración reducida de cadmio	Porcentaje de reducción de cadmio.	Media del Porcentaje de Reducción	Porcentaje Reportado
<b>control 1</b>	0.093	0.5216	0	0	0	0
<b>control 1</b>	0.094	0.5273	0	0		
<b>control 1</b>	0.094	0.5273	0	0		
<b>muestra 1A</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-2.16	-2.16	0
<b>muestra 1A</b>	0.096	0.5385	-0.0112	-3.23		
<b>muestra 1A</b>	0.094	0.5273	0.0000	-1.08		
<b>muestra 1B</b>	0.094	0.5273	0.0000	-1.08	-1.43	0
<b>muestra 1B</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-2.16		
<b>muestra 1B</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-1.07		
<b>muestra 2A</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00	-1.41	0
<b>muestra 2A</b>	0.096	0.5385	-0.0112	-2.09		
<b>muestra 2A</b>	0.096	0.5385	-0.0112	-2.13		
<b>muestra 2B</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00	-0.35	0
<b>muestra 2B</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-1.05		
<b>muestra 2B</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00		
<b>muestra 2A</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00	-0.35	0
<b>muestra 2A</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00		
<b>muestra 2A</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-1.04		
<b>muestra 2B</b>	0.093	0.5216	0.0056	1.07	-0.71	0
<b>muestra 2B</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-1.05		
<b>muestra 2B</b>	0.096	0.5385	-0.0112	-2.13		

Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia. Análisis de Datos en Excel 2013.

Cuadro 10. Porcentaje de reducción de cadmio de las muestras tratadas con un potencial de 4 Voltios con electrodos de Acero inoxidable.

Muestra	Señal	Concentración de cadmio	concentración reducida de cadmio	Porcentaje de reducción de cadmio.	Media del Porcentaje de Reducción	Porcentaje Reportado
<b>control 1</b>	0.094	0.5273	0	0	0	0
<b>control 1</b>	0.093	0.5216	0	0		
<b>control 1</b>	0.094	0.5273	0	0		
<b>muestra 1A</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00	-0.71	0
<b>muestra 1A</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00		
<b>muestra 1A</b>	0.096	0.5385	-0.0112	-2.13		
<b>muestra 1B</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00	-0.36	0
<b>muestra 1B</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-1.07		
<b>muestra 1B</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00		
<b>muestra 2A</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00	-0.36	0
<b>muestra 2A</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-1.07		
<b>muestra 2A</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00		
<b>muestra 2B</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00	-0.35	0
<b>muestra 2B</b>	0.096	0.5385	-0.0112	-2.11		
<b>muestra 2B</b>	0.093	0.5216	0.0056	1.07		
<b>muestra 2A</b>	0.093	0.5216	0.0056	1.07	-0.36	0
<b>muestra 2A</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00		
<b>muestra 2A</b>	0.096	0.5385	-0.0112	-2.13		
<b>muestra 2B</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00	-0.35	0
<b>muestra 2B</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-1.04		
<b>muestra 2B</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00		

Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia. Análisis de Datos en Excel 2013.

Cuadro 11. Porcentaje de reducción de cadmio de las muestras tratadas con un potencial de 2 Voltios con electrodos de Platino.

Muestra	Señal	Concentración de cadmio	concentración reducida de cadmio	Porcentaje de reducción de cadmio.	Media del Porcentaje de Reducción	Porcentaje Reportado
<b>control 1</b>	0.092	0.5160	0	0	0	0
<b>control 1</b>	0.095	0.5329	0	0		
<b>control 1</b>	0.094	0.5273	0	0		
<b>muestra 1A</b>	0.094	0.5273	0.0000	-2.18	-2.90	0
<b>muestra 1A</b>	0.096	0.5385	-0.0112	-4.36		
<b>muestra 1A</b>	0.094	0.5273	0.0000	-2.18		
<b>muestra 1B</b>	0.094	0.5273	0.0000	-2.18	-2.17	0
<b>muestra 1B</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-3.27		
<b>muestra 1B</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-1.07		
<b>muestra 2A</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-1.07	-0.71	0
<b>muestra 2A</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00		
<b>muestra 2A</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-1.07		
<b>muestra 2B</b>	0.096	0.5385	-0.0112	-2.13	-0.71	0
<b>muestra 2B</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00		
<b>muestra 2B</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00		
<b>muestra 2A</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00	-0.35	0
<b>muestra 2A</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00		
<b>muestra 2A</b>	0.095	0.5329	-0.0056	-1.05		
<b>muestra 2B</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00	0.00	0
<b>muestra 2B</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00		
<b>muestra 2B</b>	0.094	0.5273	0.0000	0.00		

Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia. Análisis de Datos en Excel 2013.

Cuadro12. Porcentaje de reducción de cadmio de las muestras tratadas con un potencial de 4 Voltios con electrodos de Platino.

Muestra	Señal	Concentración de cadmio	concentración reducida de cadmio	Porcentaje de reducción de cadmio.	Media del Porcentaje de Reducción	Porcentaje Reportado
<b>control 1</b>	0.095	0.5329	0	0	0	0
<b>control 1</b>	0.094	0.5273	0	0		
<b>control 1</b>	0.093	0.5216	0	0		
<b>muestra 1A</b>	0.094	0.5273	-0.0056	1.05	0.70	0
<b>muestra 1A</b>	0.095	0.5329	-0.0112	0.00		
<b>muestra 1A</b>	0.094	0.5273	-0.0056	1.05		
<b>muestra 1B</b>	0.094	0.5273	-0.0056	1.05	-0.01	0
<b>muestra 1B</b>	0.095	0.5329	-0.0112	0.00		
<b>muestra 1B</b>	0.094	0.5273	-0.0056	-1.08		
<b>muestra 2A</b>	0.094	0.5273	-0.0056	-1.07	-2.12	0
<b>muestra 2A</b>	0.095	0.5329	-0.0112	-2.11		
<b>muestra 2A</b>	0.096	0.5385	-0.0169	-3.20		
<b>muestra 2B</b>	0.096	0.5385	-0.0169	-3.20	-1.06	0
<b>muestra 2B</b>	0.094	0.5273	-0.0056	-1.05		
<b>muestra 2B</b>	0.092	0.5160	0.0056	1.07		
<b>muestra 2A</b>	0.095	0.5329	-0.0112	-2.13	-2.11	0
<b>muestra 2A</b>	0.096	0.5385	-0.0169	-3.16		
<b>muestra 2A</b>	0.094	0.5273	-0.0056	-1.04		
<b>muestra 2B</b>	0.095	0.5329	-0.0112	-2.09	-1.41	0
<b>muestra 2B</b>	0.094	0.5273	-0.0056	-1.07		
<b>muestra 2B</b>	0.094	0.5273	-0.0056	-1.09		

Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia. Análisis de Datos en Excel 2013.

Cuadro 13. Porcentaje de reducción de cadmio de las muestras tratadas con un potencial de 6 Voltios con electrodos de Platino.

Muestra	Señal	Concentración de cadmio	concentración reducida de cadmio	Porcentaje de reducción de cadmio.	Media del Porcentaje de Reducción	Porcentaje Reportado
<b>control 1</b>	0.094	0.5273	0	0	0	0
<b>control 1</b>	0.094	0.5273	0	0		
<b>control 1</b>	0.094	0.5273	0	0		
<b>muestra 1A</b>	0.083	0.4654	0.0618	11.73	11.37	11.37
<b>muestra 1A</b>	0.084	0.4711	0.0562	10.66		
<b>muestra 1A</b>	0.083	0.4654	0.0618	11.73		
<b>muestra 1B</b>	0.083	0.4654	0.0618	11.73	10.66	10.66
<b>muestra 1B</b>	0.084	0.4711	0.0562	10.66		
<b>muestra 1B</b>	0.085	0.4767	0.0506	9.59		
<b>muestra 2A</b>	0.083	0.4654	0.0618	11.73	11.37	11.37
<b>muestra 2A</b>	0.083	0.4654	0.0618	11.73		
<b>muestra 2A</b>	0.084	0.4711	0.0562	10.66		
<b>muestra 2B</b>	0.084	0.4711	0.0562	10.66	12.44	12.44
<b>muestra 2B</b>	0.082	0.4598	0.0675	12.79		
<b>muestra 2B</b>	0.081	0.4542	0.0731	13.86		
<b>muestra 2A</b>	0.083	0.4654	0.0618	11.73	12.08	12.08
<b>muestra 2A</b>	0.083	0.4654	0.0618	11.73		
<b>muestra 2A</b>	0.082	0.4598	0.0675	12.79		
<b>muestra 2B</b>	0.081	0.4542	0.0731	13.86	12.79	12.79
<b>muestra 2B</b>	0.083	0.4654	0.0618	11.73		
<b>muestra 2B</b>	0.082	0.4598	0.0675	12.79		

Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia. Análisis de Datos en Excel 2013.

Cuadro 14. Valores de concentración y absorbancia del estándar de cadmio utilizado para los electrodos de acero inoxidable y platino.

Concentración	Señal
0.1	0.0176
0.2	0.0384
0.3	0.0651
0.4	0.0907
0.5	0.1158
0.6	0.1398

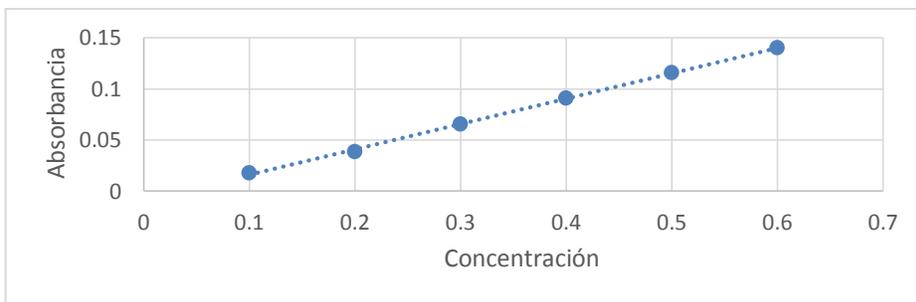
Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia.

Cuadro 15. Regresión lineal del estándar de cadmio utilizado para los electrodos de acero inoxidable y platino.

Datos	Resultado
Coeficiente de correlación	0.9992
Ecuación	$y = 0.2482x - 0.009$

Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia.

Grafica 3. Curva de Regresión lineal de Cadmio en Absorción Atómica, utilizada para los electrodos de acero inoxidable y platino



Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia. Análisis de Datos en Excel 2013.

Cuadro 16. Porcentaje de reducción de cadmio de las muestras tratadas con un potencial de 2 Voltios con electrodos de Grafito.

Muestra	Señal	Concentración de cadmio	concentración reducida de cadmio	Porcentaje de reducción de cadmio.	Media del Porcentaje de Reducción	Porcentaje Reportado
<b>control 1</b>	0.112	0.4875	0	0	0	0
<b>control 1</b>	0.113	0.4915	0	0		
<b>control 1</b>	0.113	0.4915	0	0		
<b>muestra 1A</b>	0.094	0.4150	0.0766	15.57	14.48	14.48
<b>muestra 1A</b>	0.095	0.4190	0.0725	14.75		
<b>muestra 1A</b>	0.097	0.4271	0.0645	13.11		
<b>muestra 1B</b>	0.096	0.4230	0.0685	13.93	15.30	15.30
<b>muestra 1B</b>	0.094	0.4150	0.0766	15.57		
<b>muestra 1B</b>	0.093	0.4110	0.0806	16.39		
<b>muestra 2A</b>	0.096	0.4230	0.0685	13.93	14.75	14.75
<b>muestra 2A</b>	0.096	0.4230	0.0685	13.93		
<b>muestra 2A</b>	0.093	0.4110	0.0806	16.39		
<b>muestra 2B</b>	0.092	0.4069	0.0846	17.21	16.12	16.12
<b>muestra 2B</b>	0.094	0.4150	0.0766	15.57		
<b>muestra 2B</b>	0.094	0.4150	0.0766	15.57		
<b>muestra 2A</b>	0.094	0.4150	0.0766	15.57	15.30	15.30
<b>muestra 2A</b>	0.094	0.4150	0.0766	15.57		
<b>muestra 2A</b>	0.095	0.4190	0.0725	14.75		
<b>muestra 2B</b>	0.095	0.4190	0.0725	14.75	15.57	15.57
<b>muestra 2B</b>	0.094	0.4150	0.0766	15.57		
<b>muestra 2B</b>	0.093	0.4110	0.0806	16.39		

Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia. Análisis de Datos en Excel 2013.

Cuadro 17. Porcentaje de reducción de cadmio de las muestras tratadas con un potencial de 4 Voltios con electrodos de Grafito.

Muestra	Señal	Concentración de cadmio	concentración reducida de cadmio	Porcentaje de reducción de cadmio.	Media del Porcentaje de Reducción	Porcentaje Reportado
<b>control 1</b>	0.121	0.5272	0	0	0	0
<b>control 1</b>	0.121	0.5272	0	0		
<b>control 1</b>	0.123	0.5355	0	0		
<b>muestra 1A</b>	0.061	0.2758	0.2598	48.50	48.50	48.50
<b>muestra 1A</b>	0.061	0.2758	0.2598	48.50		
<b>muestra 1A</b>	0.061	0.2758	0.2598	48.50		
<b>muestra 1B</b>	0.058	0.2632	0.2723	50.85	50.33	50.33
<b>muestra 1B</b>	0.058	0.2632	0.2723	50.85		
<b>muestra 1B</b>	0.06	0.2716	0.2639	49.28		
<b>muestra 2A</b>	0.054	0.2465	0.2891	53.98	53.98	53.98
<b>muestra 2A</b>	0.055	0.2507	0.2849	53.20		
<b>muestra 2A</b>	0.053	0.2423	0.2933	54.76		
<b>muestra 2B</b>	0.055	0.2507	0.2849	53.20	53.72	53.72
<b>muestra 2B</b>	0.053	0.2423	0.2933	54.76		
<b>muestra 2B</b>	0.055	0.2507	0.2849	53.20		
<b>muestra 2A</b>	0.053	0.2423	0.2933	54.76	55.80	55.80
<b>muestra 2A</b>	0.051	0.2339	0.3016	56.32		
<b>muestra 2A</b>	0.051	0.2339	0.3016	56.32		
<b>muestra 2B</b>	0.051	0.2339	0.3016	56.32	56.06	56.06
<b>muestra 2B</b>	0.051	0.2339	0.3016	56.32		
<b>muestra 2B</b>	0.052	0.2381	0.2975	55.54		

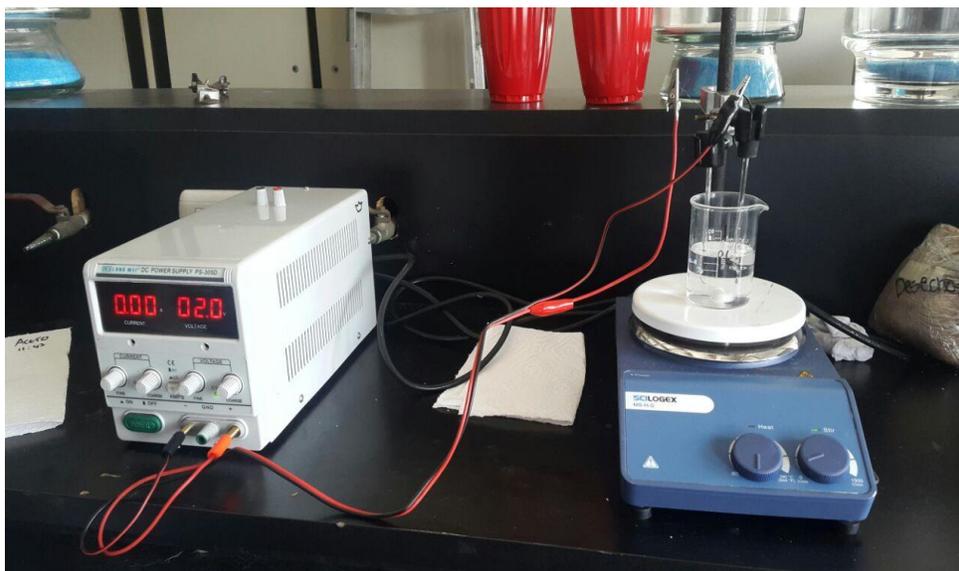
Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia. Análisis de Datos en Excel 2013.

Cuadro 18. Porcentaje de reducción de cadmio de las muestras tratadas con un potencial de 6 Voltios con electrodos de Grafito.

Muestra	Señal	Concentración de cadmio	concentración reducida de cadmio	Porcentaje de reducción de cadmio.	Media del Porcentaje de Reducción	Porcentaje Reportado
<b>control 1</b>	0.12	0.4875	0	0	0	0
<b>control 1</b>	0.115	0.4915	0	0		
<b>control 1</b>	0.12	0.5197	0	0		
<b>muestra 1A</b>	0.075	0.3384	0.1813	34.88	36.69	36.69
<b>muestra 1A</b>	0.073	0.3304	0.1894	36.43		
<b>muestra 1A</b>	0.07	0.3183	0.2015	38.76		
<b>muestra 1B</b>	0.072	0.3263	0.1934	37.21	38.76	38.76
<b>muestra 1B</b>	0.07	0.3183	0.2015	38.76		
<b>muestra 1B</b>	0.068	0.3102	0.2095	40.31		
<b>muestra 2A</b>	0.074	0.3344	0.1853	35.66	34.88	34.88
<b>muestra 2A</b>	0.076	0.3425	0.1773	34.11		
<b>muestra 2A</b>	0.075	0.3384	0.1813	34.88		
<b>muestra 2B</b>	0.072	0.3263	0.1934	37.21	38.50	38.50
<b>muestra 2B</b>	0.069	0.3143	0.2055	39.53		
<b>muestra 2B</b>	0.07	0.3183	0.2015	38.76		
<b>muestra 2A</b>	0.072	0.3263	0.1934	37.21	39.28	39.28
<b>muestra 2A</b>	0.068	0.3102	0.2095	40.31		
<b>muestra 2A</b>	0.068	0.3102	0.2095	40.31		
<b>muestra 2B</b>	0.069	0.3143	0.2055	39.53	39.02	39.02
<b>muestra 2B</b>	0.069	0.3143	0.2055	39.53		
<b>muestra 2B</b>	0.071	0.3223	0.1974	37.98		

Fuente: datos experimentales obtenidos en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia. Análisis de Datos en Excel 2013.

Imagen 1. Diseño de una celda electroquímica para la reducción de cadmio en solución acuosa.



Fuente: Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia.

Imagen 2. Tratamiento electroquímico de las muestras.



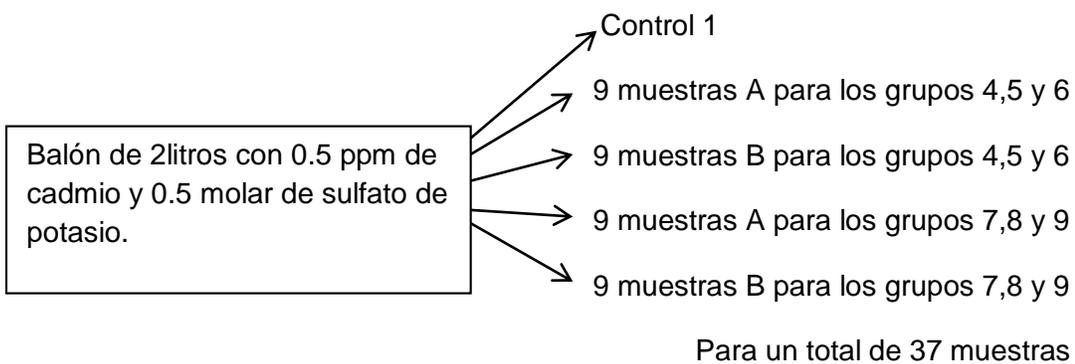
Fuente: Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia.

Imagen 3. Electrodo de acero inoxidable después del tratamiento electroquímico.

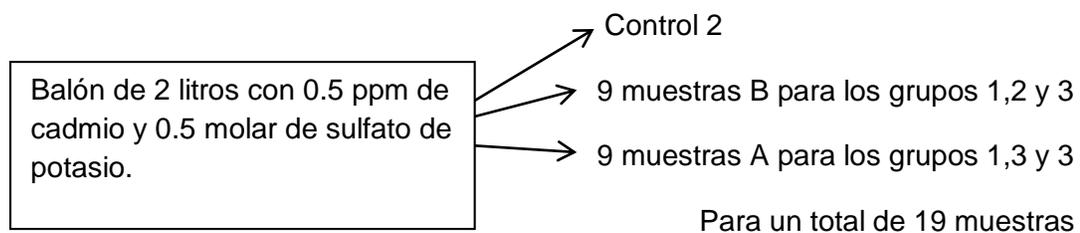


Fuente: Laboratorio de Fisicoquímica de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia.

Esquema 1. Preparación de las muestras de los Grupos: cuatro, cinco, seis (electrodos de platino a 2V, 4V y 6V) y siete, ocho y nueve (electrodos de acero inoxidable a 2V, 4V y 6V)



Esquema 2. Preparación de las muestras de los Grupos: uno, dos, tres (electrodos de grafitos a 2V, 4V y 6V).



---

Steebens Obdulio Rosales Pérez  
Autor de Tesis

---

Licenciado Oswaldo Efraín Martínez Rojas  
Asesor

---

Licenciado Manuel Alejandro Muñoz Wug  
Asesor

---

Licda. M.A. Irma Nohemí Orozco  
Directora de escuela



---

Dr. Rubén Dariel Velásquez Miranda  
Decano