

## PROYECTO MERCURIO CERO. REMOCIÓN DE MERCURIO MEDIANTE ELECTRO- COAGULACIÓN, EN MUESTRAS DE AGUA DEL RÍO ARZOBISPO CUENCA MEDIA

---

*Luis Eduardo Peña Prieto*

Universidad Distrital

*Adriana Alméciga Gómez*

Universidad ECCI, Semillero PRISMA,  
Dirección Ciencias Básicas, COLOMBIA

*Rafael Meza Benitez*

Universidad ECCI, Semillero PRISMA,  
Dirección Ciencias Básicas, COLOMBIA

*Xiomara Jiménez Muñoz*

Universidad ECCI, Semillero PRISMA,  
Dirección Ciencias Básicas, COLOMBIA

*Johanna Bonilla*

Universidad ECCI, Semillero PRISMA,  
Dirección Ciencias Básicas, COLOMBIA

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



**Resumen:** La creciente demanda mundial y nacional de agua, por un lado, y la indiscriminada contaminación del recurso hídrico, por el otro, generan la urgente necesidad de desarrollar e implementar innovadoras tecnologías, más eficaces, eficientes y económicas de tratamiento de aguas residuales. La electrocoagulación se destaca por su sencillez, economía y fácil aplicabilidad en el tratamiento de aguas residuales de diferente procedencia (industrial, domestica), particularmente las contaminadas por mercurio. Además, genera pocos residuos secundarios, no implica compra y almacenamiento de reactivos químicos (coagulantes, floculantes, desinfectantes), ya que estos son generados *in situ* en el proceso de purificación del agua por electrocoagulación. Es rentable económicamente y presenta altos porcentajes de remoción (cerca o incluso el 100%, como en el caso del mercurio en la presente investigación). En la presente investigación se tomó agua del río Arzobispo (Bogotá-Colombia), se determinó experimentalmente por absorción atómica el contenido de mercurio (0,002 ppm), que resultó ser superior al límite permitido por la normatividad tanto nacional como internacional (0,001 ppm). Seguidamente se le realizó un tratamiento depurador por electrocoagulación, que permitió eliminar totalmente el mercurio presente. Para ello se realizaron 15 sesiones de electrocoagulación de a 30 minutos cada una de ellas. Los resultados de presencia de mercurio, llevados a cabo por absorción atómica mostraron PRESENCIA NO DETECTABLE.

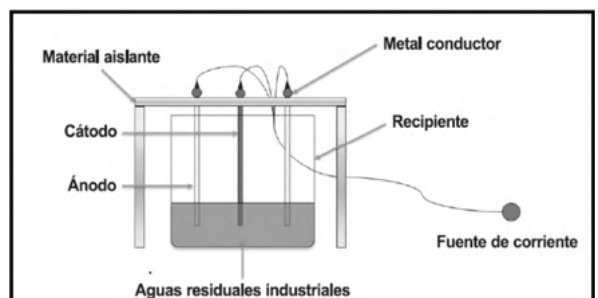
**Palabras claves:** Electrocoagulación, Mercurio, Agua Residual, Coagulación, Floculación.

**Objetivo:** Remoción de mercurio presente en aguas residuales vertidas al río Arzobispo (Bogotá-Colombia).

## INTRODUCCIÓN

### ELECTROCOAGULACIÓN

- Técnica emergente de remediación de aguas residuales que surge a principios del siglo XX.
- Proceso en el agua residual de desestabilización de sustancias disueltas (sales inorgánicas, metales pesados tóxicos, otros), material sólido en suspensión (coloides) y líquido emulsionado (aceites, grasas) mediante la introducción de corriente eléctrica en el medio.
- La corriente eléctrica se introduce por medio de una celda electrolítica, los electrodos de la cual generan el agente coagulante (cationes de metal, comúnmente  $Al^{3+}$  en el ánodo) y burbujas de gas hidrógeno (en el cátodo) que permiten la electroflotación y/o electro-sedimentación de los contaminantes ya coagulados.
- Celda electrolítica:

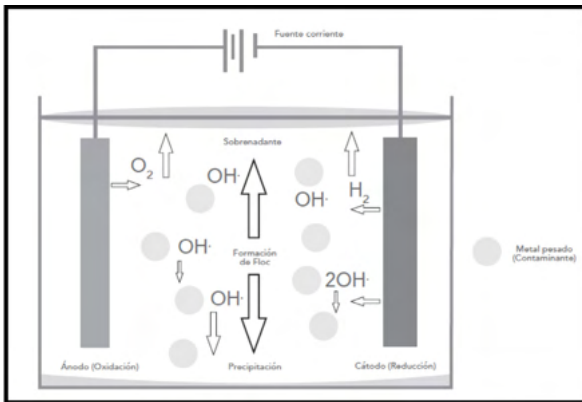


Sistema de electrocoagulación

Fuente: Nelly Bibiana Morales Posada (2010)

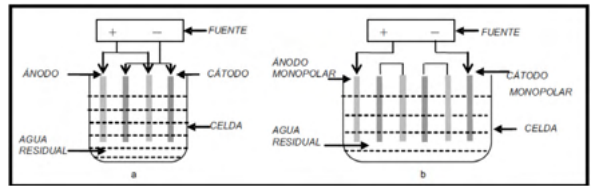
### **Electrocoagulación:**

- En el ánodo ocurren todos los procesos de OXIDACIÓN y en el cátodo de REDUCCIÓN



Fuente: Gema Eunice Acosta Niño y otros (2010).

- El reactor puede trabajar en régimen continuo o Batch, en paralelo (a) o en serie (b):



Reactores para electrocoagulación tipo Bach. a) Conectados en paralelo; b) Conectados en serie.

Fuente: Álvaro Arango Ruiz (2005).

<b>LEY 23 de 1973 – Expedida por: Congreso de Colombia</b>	
<b>Descripción:</b> Establece como deber de las personas, la protección de los recursos culturales y naturales del país, y de velar por la conservación de un ambiente sano.	<b>Aplicación:</b> Prevención y control de la contaminación mejoramiento y restauración (tratamiento) de recursos naturales.
<b>DECRETO LEY 2811 de 1974 – Expedida por: Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible</b>	
<b>Descripción:</b> Código nacional de los recursos naturales renovables y no renovables y de protección al medio ambiente. El ambiente es patrimonio común, el estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo. Regula el manejo de los RNR, la defensa del ambiente y sus elementos.	<b>Aplicación:</b> Considera los factores que deterioran el medio ambiente, entre ellos alteraciones a los cuerpos de agua natural. Postulados relacionados directamente con el agua como dominio público. Adquisición de derecho al uso del agua.
<b>LEY 9 de 1979 – Expedida por: Congreso de la republica</b>	
<b>Descripción:</b> Por la cual se dictan medidas sanitarias	<b>Aplicación:</b> Los procedimientos y las medidas que se deben adoptar para la regulación, legalización y control de los descargos de residuos y materiales que afectan o pueden afectar las condiciones sanitarias del Ambiente. Clasificación del agua según su uso dentro de la cual se encuentra "industrial".
<b>LEY 99 de 1993 – Expedida por: Congreso de Colombia</b>	
<b>Descripción:</b> Crea el Ministerio del Medio Ambiente y Organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA). Reforma el sector Público encargado de la gestión ambiental. Organiza el sistema Nacional Ambiental y exige la Planificación de la gestión ambiental de proyectos.	<b>Aplicación:</b> Las políticas y regulaciones a las que se sujetarán la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables y el medio ambiente, a fin de asegurar el desarrollo sostenible.

Alguna normatividad colombiana relacionada con el tratamiento y conservación del recurso hídrico.

Fuente: Sonia Catalina Apráez Aragón y Juan Sebastián García Garay (2015).

<b>RESOLUCION 1433 de 2004 – Expedida por: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial</b>	
<b>Descripción:</b> Por la cual se reglamenta el artículo 12 del Decreto 3100 de 2003, sobre Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV	<b>Aplicación:</b> Es el conjunto de programas, proyectos y actividades, con sus respectivos cronogramas e inversiones necesarias para avanzar en el saneamiento y tratamiento de los vertimientos, incluyendo la recolección, transporte, tratamiento y disposición final de las aguas residuales descargadas al sistema público de alcantarillado, tanto sanitario como pluvial, los cuales deberán estar articulados con los objetivos y las metas de calidad y uso que defina la autoridad ambiental competente para la corriente.
<b>RESOLUCIÓN 3957 de 2009 – Expedida por: Secretario Distrital de Ambiente</b>	
<b>Descripción:</b> Por la cual se establece la norma técnica, para el control y manejo de los vertimientos realizados a la red de alcantarillado público en el Distrito Capital	<b>Aplicación:</b> Usos del agua y residuos líquidos. Se aplicará a los vertimientos de aguas residuales diferentes a las de origen doméstico dentro del perímetro urbano de Bogotá D.C. Determinación de los valores de referencia y las características que deben cumplir todos los vertimientos realizados a la red de alcantarillado.
<b>RESOLUCIÓN 631 de 2015 – Expedida por: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible</b>	
<b>Descripción:</b> Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.	<b>Aplicación:</b> Límites máximos permisibles para vertimientos de tipo ARnD (Agua residual no doméstica), proveniente de Fabricación y manufactura de bienes (dentro de la cual se incluye la industria textil)

Alguna normatividad colombiana relacionada con el tratamiento y conservación del recurso hídrico.

Fuente: Sonia Catalina Apráez Aragón y Juan Sebastián García Garay (2015).

## DISEÑO EXPERIMENTAL

1. Diseño y elaboración del reactor electroquímico (celda electrolítica)
2. Diseño y elaboración de los electrodos. Ánodo (Aluminio); cátodo (Hierro)
3. Montaje de la celda electrolítica
4. Toma de muestras de agua del río Arzobispo (10 litros por muestra)
5. Muestra de agua de trabajo en el reactor electroquímico (8 litros)
6. Análisis del agua residual inicial para determinar el contenido de mercurio (0,002 ppm)
7. Electrocoagulación y filtración
8. Análisis final de contenido de mercurio (Mercurio cero)

## CARACTERIZACIÓN INICIAL DE LA SOLUCIÓN ACUOSA

PROPIEDAD	VALOR INICIAL.
Temperatura	16
PH	5,9
Mercurio total.	0.002 ppm.

Variables de estudio

Independiente

Tiempo de electrocoagulación. ->

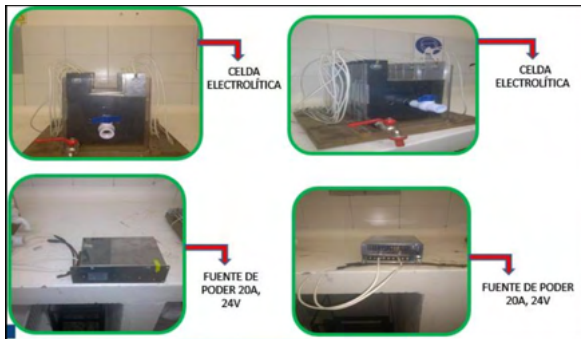
15 sesiones de 30 minutos cada una.

Dependiente

Cantidad de mercurio presente -> 0,002 ppm.

## RESULTADOS

### CELDA ELECTROQUÍMICA:



- Acrílico transparente de 3 mm de grosor.
- Electrodo intercalados, uno de aluminio seguido de uno de hierro.
- Área de cada electrodo: 25 cm x 25 cm= 625 cm.<sup>2</sup>
- Separación de los electrodos: 1 cm
- Capacidad de la celda: 8 litros.
- Parámetros de corriente: 24 voltios, 20 amperios= 480 vatios hora.
- Tiempo de residencia: 15 sesiones de 30 minutos cada una

### Caracterización final de la muestra en estudio

Después de cada sesión de 30 minutos de electrocoagulación se procedió a dejar sedimentar la muestra durante 10 minutos y se realizó un filtrado artesanal mediante una pieza de tela fina. (Lino). Terminada la electrocoagulación última, la sesión número 15, se sometió la muestra a una filtración con bomba de vacío, utilizando el kitasato. El embudo de porcelana se utilizó colocándole doble papel filtro.

Finalmente, la muestra filtrada se analizó en un equipo de absorción atómica, marca MILESTONE, MODELO DMA-80, Serial 1050870. ANALIZADOR DIRECTO DE MERCURIO, en los laboratorios COLCAN (Bogotá).

Los resultados demostraron la REMOCIÓN TOTAL, MERCURIO CERO, al obtener del equipo de absorción atómica: NO DETECTABLE.

**Concentración final de mercurio después de la electrocoagulación.**

**Tiempo de residencia**

7.5 HORAS

**Parámetro**

-0- ppm (no detectable)

**Cálculos de consumo másico del electrodo de sacrificio (aluminio), electricidad y costos del proceso de electrocoagulación**

- La masa del electrodo de aluminio disminuye durante el proceso de electrocoagulación.
- Según las leyes de Faraday:

$$w_{Al} = \frac{Eq-g(Al)}{96.500\text{Coulomb}} * I(A) * t(s) = \frac{\left(\frac{27}{3}\right)gAl}{96.500\text{Coulomb}} * 20A * 3600s = 6,715\text{ g Al/h}$$

1 Faraday=96.500 Coulomb

- Precio de aluminio: COP\$6000/Kg
- Precio de Al por desgaste por proceso de 7,5 horas de electrocoagulación de 8 litros de agua residual hasta Mercurio cero:

$$6000 \frac{\$}{Kg} * 0,006715 \frac{Kg}{h} * 7,5 h = COP\$302,18$$

- Precio Kwh promedio en Chapinero (Bogotá): COP\$500
- Consumo de energía eléctrica en el proceso de electrocoagulación hasta Mercurio cero: 20A \* 24V = 480 vatios (w)
- Precio de consumo eléctrico por proceso de 7,5 horas de electrocoagulación de 8 litros de agua residual hasta Mercurio cero:

$$500 \frac{\$}{Kwh} * 0,480Kwh * 7,5 h = COP\$ 1800$$

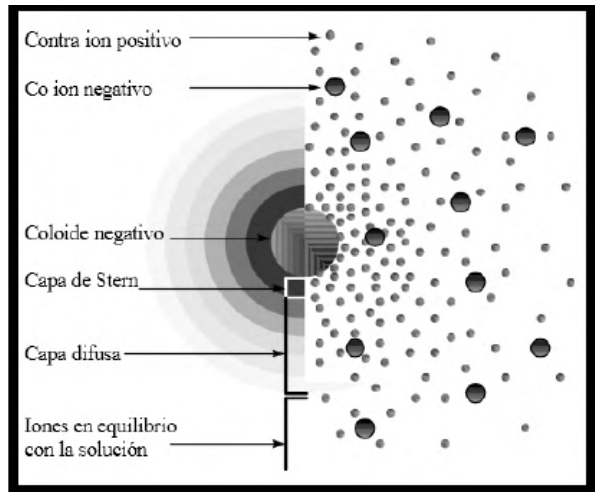
- Precio total de electrocoagulación de 8 litros de agua residual hasta Mercurio cero:

$$\text{COP\$}302,18 + \text{COP\$} 1.800 = \text{COP\$} 2.102$$

~ **COP\$2000**

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

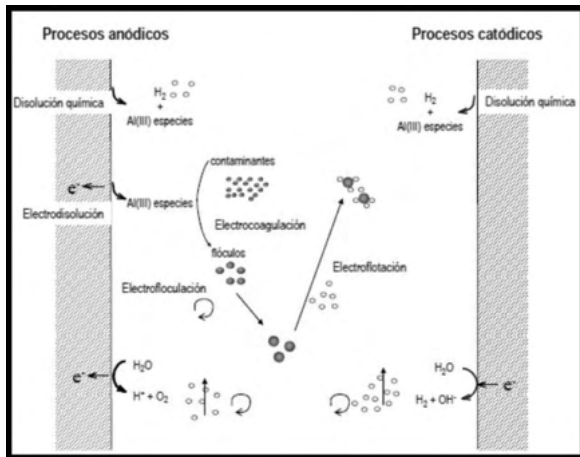
- La electrocoagulación demostró ser una técnica efectiva de tratamiento de aguas residuales que presentan mercurio.
- Procesos que ocurren en la electrocoagulación:



Capas de un coloide.

Fuente: (Yoval, et al., 2000).

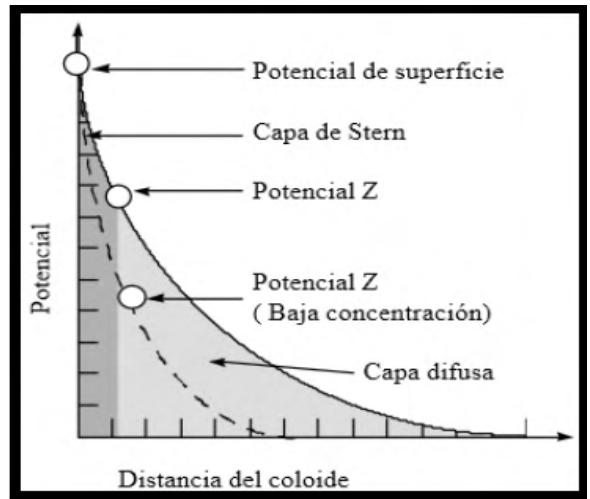
a) Oxidación anódica, reducción catódica, electrocoagulación, electroflotación, electro sedimentación



Fuente: (Ruíz, et al., 2007).

b) Desestabilización de partículas coloidales y emulsionadas:

c) Disminución del Zeta potencial, coagulación y floculación de partículas coloidales y emulsionadas:



Potencial Zeta y potencial superficial Fuente: (Yoval, et al., 2000).

## REACCIONES QUÍMICAS DE ELECTRODO

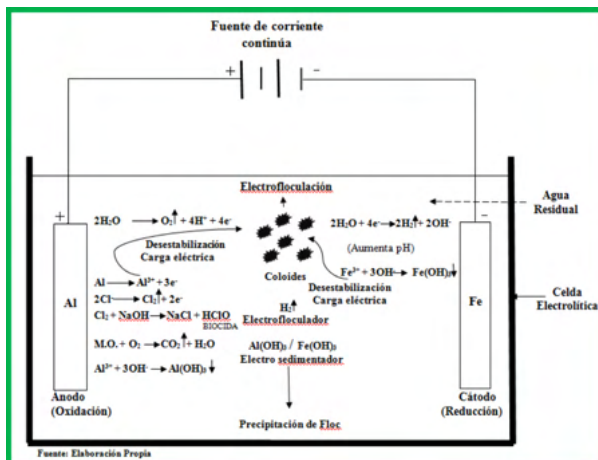
### Anodo:

$2 H_2O \rightarrow O_2 \uparrow + 4 H^+ + 4 \bar{e}$	Formación de oxígeno molecular que evita malos olores y la eutrofización del agua electro coagulada.
$Al \rightarrow Al^{3+} + 3 \bar{e}$ $Al^{3+} + 3 OH^- \rightarrow Al(OH)_3 \downarrow$	Precipitado amorfo que atrapa materia electro coagulada y provoca su flotación y/o sedimentación.
$MO + O_2 \rightarrow CO_2 \uparrow + H_2O \uparrow$	-Oxidación de materia orgánica. -Disminución de DBO, DQO, COT, DOT.
$2 Cl^- \rightarrow Cl_2 \uparrow + 2 \bar{e}$ $Cl_2 + NaOH \rightarrow NaCl + HClO$	Generación <i>in situ</i> de un Agente biocida, HClO (eliminación de microorganismos patógenos)

### Cátodo:

$2 H_2O + 4 \bar{e} \rightarrow 2 H_2 \uparrow + 2 OH^-$	-Generación de Hidrógeno gaseoso- Agente electro floculador. -Aumento de pH. Favorece la precipitación de metales pesados tóxicos en forma de sus hidróxidos. -Disminución de la dureza del agua. -Neutralización del agua residual inicial (disminución de costos económicos por adición de agentes estabilizantes de pH).
$Fe^{3+} + 3 OH^- \rightarrow Fe(OH)_3 \downarrow$	Precipitado amorfo que atrapa materia electro coagulada y provoca su flotación y/o sedimentación.
$HCO_3^- + OH^- \rightarrow H_2O + CO_3^{2-}$ $CO_3^{2-} + Me^{2+} \rightarrow MeCO_3 \downarrow$ $Me^{2+} = Ca^{2+}, Mg^{2+}, otros.$	Eliminación de la dureza del agua.

## PROCESOS ELECTROQUÍMICOS DE ELECTRODO



## CONCLUSIONES

1. Por electrocoagulación se logró la eliminación del mercurio presente en el agua del río Arzobispo hasta MERCURIO CERO
2. Se diseñó y construyó un prototipo de celda electrolítica, que le imprime un valor agregado didáctico a la investigación
3. Se llevó a cabo la implementación industrial del prototipo a nivel de planta piloto para el tratamiento de las aguas residuales de una industria de galvanoplastia
4. Se realizó un balance de costos del proceso, que permitió concluir que este es financieramente viable (para electrocoagular hasta  $1m^3$  de agua residual)
5. La electrocoagulación es una tecnología emergente con amplias perspectivas de aplicación en pequeñas plantas de tratamiento de aguas y en países en desarrollo, ya que:

- a) Los equipos requeridos son de fácil diseño y no requieren grandes espacios físicos
- b) Se suprime el uso de sustancias químicas (coagulantes, floculantes, desinfectantes, reguladores de pH)

c) Se disminuye sustancialmente la formación de lodos y la necesidad de su posterior tratamiento y disposición

d) Los lodos generados tienen menor contenido de agua ligada, lo que facilita su tratamiento ya que se evita el proceso de secado.

## REFERENCIAS

1. Arango Ruíz Álvaro. La electrocoagulación, una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista lasallista de investigación, vol. 2 N0 1. Corporación universitaria Lasallista. Medellín- Colombia. enero-junio-2005
2. Bain Robert, Evaluación global de la exposición a la contaminación fecal a través del agua potable-Instituto Del Agua. Universidad Carolina Del Norte. 8-mayo-2014.
3. Camaselle, MA. Sanromán. Pazos, M. t.Ricart c (2005). Decolorouzitación of textile índigo dye by electric current, artículo en internet, base de datos science Direct en Engeneering Geology-77.
4. Gleesson Tom et al, 2012. Balance hídrico de acuíferos globales, revelado por la huella por la huella de agua subterránea. Universidad MC GILL-MONTREAL-CANADA.
5. Ministerio de la protección social, Ministerio de Medio ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 0631-marzo-17-2015.
6. Mollah M, yousuf,journal de hazardous materials. Vol. 84. PP.29
7. Morales Posada Nelly Bibiana. Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas. Revista: Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 20-1, pp. 33-44. Bogotá, Junio de 2010. ISSN 0124-8170
8. Niño Acosta G. E. y otros. La electrocoagulación como un tratamiento eficiente para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales. Revista Universidad Militar Nueva Granada, Volumen 9, Número 2, Páginas 306-317 noviembre 2013. ISSN 1900-4699.
9. PNUMA, Programa De Las Naciones Unidas Para El Medio Ambiente. Evaluación Mundial Sobre Mercurio. GINEBRA-SUIZA-2002. Publicación en español-2005.