



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Influencia del pH y el tiempo en la remoción de cromo hexavalente presente en
soluciones acuosas utilizando la electrocoagulación

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR:

MENDOCILLA MURILLOS CARLOS EDUARDO

ASESOR:

Dr. ALFREDO CRUZ MONZÓN

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

CALIDAD Y GESTIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES

TRUJILLO – PERÚ

2018

PÁGINA DEL JURADO

Dr. Quezada Álvarez, Medardo

PRESIDENTE

Mg. Moreno Eustaquio, Walter

SECRETARIO

Dr. Cruz Monzón, José Alfredo

VOCAL

DEDICATORIA:

A Dios.

Por bendecirme con la oportunidad de poder estudiar una carrera profesional, por darme salud, por brindarme su infinito amor incondicional y misericordioso y por los padres que me dio.

A mi mamá Ángela.

Por ser ejemplo de lucha constante. A ti madre por haberme depositado tu confianza y brindarme tu amor y comprensión incondicional.

A mis hermanos y amigos.

Por alentarme en cada momentos, por escucharme y entenderme cuando me ausentaba de algunas reuniones.

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

Por brindarme la vida a través de unos padres ejemplares, porque sé que él ha cruzado personas maravillosas en mi camino y porque sé que ha creado las situaciones necesarios para yo poder culminar mi carrera profesional.

A mi madre

Por brindarme su apoyo en todo sentido, porque sé que sin su ayuda no hubiera podido culminar esta significativa etapa de mi vida. Te amo mamá.

A mi padre

Por satisfacer económicamente gran parte de mi carrera profesional, y sé que sin su ayuda me hubiera costado muchísimo estar donde estoy ahora. Gracias papá.

A mis hermanos

Por comprender mis momentos de ausencia.

A la universidad y su plana docente

Por el uso de sus instalaciones y a mis docentes por compartir sus conocimientos con paciencia y profesionalismo.

DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD

Yo Carlos Eduardo Mendocilla Murillos con DNI N° 47543767, a efecto de cumplir con las disposiciones vigentes consideradas en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental, declaro bajo juramento que toda la documentación que acompaño es veraz y auténtica.

Así mismo, declaro también bajo juramento que todos los datos e información que se presenta en la presente tesis son auténticos y veraces.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas de la Universidad César Vallejo.

Trujillo, 12 de julio del 2018

Carlos Eduardo Mendocilla Murillos

DNI: 47543767

PRESENTACIÓN

Señores miembros del jurado:

En cumplimiento del Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad César Vallejo presento ante ustedes la tesis titulada: “Influencia del pH y el tiempo en la remoción de cromo hexavalente presente en soluciones acuosas utilizando la electrocoagulación”, la misma que someto a vuestra consideración y espero que cumpla con los requisitos de aprobación para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental.

El autor

ÍNDICE

RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Realidad problemática	1
1.2. Trabajos previos	3
1.2.1. Nivel internacional	3
1.2.2. Nivel nacional	6
1.2.3. Nivel regional.....	8
1.3. Teorías relacionadas al tema	8
1.3.1. El cromo	8
1.3.2. El cromo (VI) en soluciones acuosas	9
1.3.4. Técnicas para tratar soluciones acuosas de cromo (VI)	10
1.3.5. Electrocoagulación	11
1.3.6. Parámetros para el proceso de electrocoagulación.....	12
1.4. Formulación al problema	13
1.5. Justificación del estudio.....	13
1.6. Hipótesis	14
1.7. Objetivos.....	14
1.7.1. Objetivo general	14
1.7.2. Objetivos específicos.....	14
II. METODO	15
2.1. Diseño de investigación.....	15
2.1.1. Tipo de investigación	15
2.1.2. Diseño experimental.....	16

2.2. Variables, operacionalización	17
2.2.1. Variables	17
2.2.2. Operacionalización de variables	17
2.3. Población y muestra	19
2.3.1. Población	19
2.3.2. Muestra	19
2.3.3. Unidad de análisis	19
2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad	19
2.4.1. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	19
2.4.2. Validez y confiabilidad del instrumento.....	19
2.5. Métodos de análisis de datos	19
2.6. Aspectos éticos.....	19
III. RESULTADOS	21
3.1. Prueba estadística paramétrica	23
3.1.1. Comprobación de los supuestos	23
3.1.2. ANOVA factorial	24
3.1.3. Prueba post hoc	25
IV. DISCUSIÓN	26
V. CONCLUSIONES	31
VI. RECOMENDACIONES	32
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
ANEXOS	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sub variables de las variables independientes	16
Tabla 2. Replicas y combinaciones de tratamientos	16
Tabla 3. Operacionalización de variables	18
Tabla 4. Remoción media de cromo (VI).....	21
Tabla 5. Porcentaje de remoción de cromo	22
Tabla 6. Análisis de varianza de dos factores.....	24
Tabla 7. Materiales, equipos y reactivos	40
Tabla 8. Tabla de datos de curva de calibración.....	44
Tabla 9. Lectura de absorbancias de cromo total	47
Tabla 10. Parámetros iniciales al tratamiento.....	48
Tabla 11. Resultados de concentraciones de cromo (VI).....	49
Tabla 12. Valores de remoción de cromo (VI).....	50
Tabla 13. Normalidad para el factor pH.....	50
Tabla 14. Normalidad para el factor tiempo.....	51
Tabla 15. Homogeneidad de varianzas	52
Tabla 16. Pruebas post hoc para la variable pH	54
Tabla 17. Prueba post hoc para la variable tiempo	55
Tabla 18. Comparaciones múltiples para la variable pH	56
Tabla 19. Comparaciones múltiples para la variable tiempo	57
Tabla 20. Datos ajustados para la cinética de remoción de cromo (VI) a pH 3	58
Tabla 21. Datos ajustados para la cinética de remoción de cromo (VI) a pH 5.5	59
Tabla 22. Datos ajustados para la cinética de remoción de cromo (VI) a pH 8	60
Tabla 23. Remoción de cromo por área de electrodo	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Influencia del pH en la remoción de cromo (VI) respecto al tiempo	21
Figura 2. Remoción media de cromo con respecto al pH a diferente tiempo	22
Figura 3. Porcentaje de remoción de cromo (VI)	23
Figura 4. Diagrama de bloques del procedimiento experimental	41
Figura 5. Diseño y medidas del electrodo	42
Figura 6. Recta de calibración para la determinación de cromo total.....	44
Figura 7. Independencia y linealidad de las muestras.....	53
Figura 8. Cinética de remoción de cromo (VI) a pH 3	59
Figura 9. Cinética de remoción a pH 5.5	60
Figura 10. Cinética de remoción de cromo (VI) a pH 8	61
Figura 11. Remoción de cromo por área de electrodo en función del tiempo	62
Figura 12. Polinómica para la remoción de cromo (VI) en función del tiempo a pH 3	63
Figura 13. Electrodo de aluminio	64
Figura 14. Enfriamiento de la sal de dicromato de potasio	64
Figura 15. Medición de la masa del cloruro de sodio	65
Figura 16. Regulación del pH.....	65
Figura 17. Muestras preparadas a diferentes pH	66
Figura 18. Medición de la conductividad eléctrica de las muestras preparadas.....	66
Figura 19. Proceso de electrocoagulación del cromo (VI).....	67
Figura 20. Muestras pre y post al tratamiento	67

RESUMEN

El presente trabajo de investigación, consistió en demostrar la influencia del pH y el tiempo en la remoción de cromo (VI) de una solución acuosa utilizando la electrocoagulación.

La unidad muestral estuvo conformada por 900 mililitros de concentración de 20.5917 ppm cromo (VI), la cual contenía también una concentración de 0.05 M de cloruro de sodio (NaCl) con la finalidad de incrementar la conductividad de la solución.

Para llevar acabo los experimentos se diseñó una celda de electrocoagulación de 900 mL de capacidad efectiva, dentro la cual se acondicionaron 8 electrodos de aluminio con una área de contacto de 75.6 cm², los cuales estuvieron separadas por 1 cm entre electrodos; Así mismo, la celda fue alimenta por una fuente de energía continua de 4 amperios y 5 voltios.

Este trabajo de investigación requirió de un diseño bifactorial, cuyas variables manipuladas consistieron de tres niveles cada una; el pH (3, 5.5 y 8) y el tiempo (5, 10 y 15), las cuales fueron combinadas, obteniéndose un total de 9 experimentos a los cuales se le realizó tres repeticiones. Para el análisis estadístico se utilizó el ANOVA de dos factores con la finalidad de determinar que variables o combinaciones influyen, en la remoción de cromo (VI). Así mismo, se realizó las pruebas post hoc para identificar qué nivel del pH y tiempo son los óptimos para la remoción de cromo (VI) en la electrocoagulación. Por tanto, se llegó a determinar, que en un pH 3 y en un tiempo de 15 minutos, se obtiene la máxima remoción, cuyo valor aproximado es de 20.0652 ppm de cromo (VI) o 97.44%.

En conclusión se llegó a demostrar que efectivamente existe influencia por parte de las variables independientes en la remoción de cromo (VI) de una solución acuosa, utilizando la electrocoagulación como tratamiento.

Palabras claves: Cromo (VI), electrocoagulación, influencia, pH, tiempo.

ABSTRACT

The present research work consisted in demonstrating the influence of pH and time in the removal of chromium (VI) from an aqueous solution using electrocoagulation.

The sample unit consisted of 900 milliliters of concentration of 20.5917 ppm chromium (VI), which also contained a concentration of 0.05 M sodium chloride (NaCl) in order to increase the conductivity of the solution.

To carry out the experiments, an electrocoagulation cell of 900 mL of effective capacity was designed, in which 8 aluminum electrodes with a contact area of 75.6 cm² were conditioned, which were separated by 1 cm between electrodes; Likewise, the cell was powered by a continuous power source of 4 amps and 5 volts.

This research work required a two factor design, whose manipulated variables consisted of three levels each; the pH (3, 5.5 and 8) and the time (5, 10 and 15), which were combined, obtaining a total of 9 experiments to which three repetitions were made. For the statistical analysis, the two-factor ANOVA was used in order to determine which variables or combinations influence the removal of chromium (VI). Likewise, post hoc tests were carried out to identify which level of pH and time are optimal for the removal of chromium (VI) in electrocoagulation. Therefore, it was determined that at a pH of 3 and a time of 15 minutes, the maximum removal is obtained, whose approximate value is 20.0652 ppm of chromium (VI) or 97.44%.

In conclusion it was shown that there is indeed an influence on the part of the independent variables in the removal of chromium (VI) from an aqueous solution, using electrocoagulation as a treatment.

Keywords: Chromium (VI), electrocoagulation, influence, pH, time.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

El cromo es un elemento químico cuyos estados de oxidación más comunes son cromo (III) y cromo (VI), siendo el primero más estable, menos tóxico y menos soluble, inclusive en pequeñas dosis tiene beneficios para la salud en especial para personas con diabetes, ya que controla los niveles de azúcar en la sangre y aumenta la capacidad de las células para regular la insulina. El segundo es altamente oxidante, muy inestable y altamente tóxico (Albert, 1997, p. 227).

Las industrias dedicadas al rubro de la fabricación de pinturas, preservación de madera, fábricas de aleaciones metálicas, curtiembres, pigmentos textiles, galvanizados, entre otros, en sus procesos generan efluentes con altas concentraciones en cromo (VI) (Sans y De Pablo, 1989, p. 67).

En la provincia de Trujillo las descargas de cromo se generan principalmente en la industria del curtido, en cuyos procesos utilizan sales de cromo para que sea absorbido por las pieles, pero siempre queda un cierto porcentaje que no es aprovechado, el cual forma parte de sus residuos líquidos (Chávez, 2010 en Arboleda y Herrera, 2015, p.22). Entre los tratamientos que se aplican a los vertimientos de estas industrias son químicos y puede que no sean muy eficientes en la remoción de cromo (VI).

Cabe la posibilidad de la existencia de algunas curtiembre en la provincia de Trujillo operen de manera informal, y no estén dando ningún tipo de tratamiento a sus efluentes. Esto pone en riesgo de contaminación el recurso hídrico, el recurso suelo y la calidad en la salud de la población, ya que esos vertimientos son conducidas a unas plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) domésticas las cuales no están diseñadas para el tratamiento de metales pesados y demás contaminantes de alta toxicidad.

Existen en la actualidad investigaciones donde se estudian diferentes métodos y/o tecnologías para la eliminación de cromo en efluentes de las diferentes industrias, como la electroquímica, físicas, químicas y biológicas (Elías et al., 2009, p.107; Mollah et al., 2001 en Arboleda y Herrera, 2015, p. 28; Volesky, 1990 en Valderrama, 1998, p. 74).

La electrocoagulación es un proceso electroquímico utilizado como método para la depuración de aguas residuales mediante la desestabilización de los contaminantes por medio del paso de corriente eléctrica en un medio acuoso a bajo voltaje, el cual se lleva a cabo en un reactor especial donde tienen que estar ubicados los electrodos (García y Letón, 2012, p. 34).

Este proceso genera elevada carga de cationes desestabilizando los contaminantes formando flóculos y estos por acción del gas que se produce son elevados hacia la superficie, de donde se pueden separar por medios mecánicos (Rajechwar y Ibanes, 1997 y Holt, Barton y Mitchell, 2005 en Arboleda y Herrera, 2015, p. 29).

Es por eso que tiene la capacidad de remover DBO, DQO, materia orgánica, metales pesados y oxidar compuestos tóxicos a no tóxicos (García y Letón, 2012, p. 139). Estas tecnologías puede ser útil para efluentes de industrias de galvanizados, curtido de cueros, industrias alimentarias, plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, plantas potabilizadoras de agua, textiles, minería, entre otras.

En el presente proyecto de se utilizará electrodos metálicos de aluminio, ya que es el más abundante, económico, eficiente, y fácil de conseguir en comparación con otros tipos de materiales utilizados como electrodos.

La electrocoagulación es el tipo de tratamiento electroquímico que puede solucionar la problemática para los efluentes de procedencia industrial contaminados con metales pesados, por su eficiencia según y porque los gastos en energía eléctrica pueden compensarse, por la recuperación de agua para su recirculación al proceso y posiblemente de algunos insumos químicos.

De esta manera minimizar la explotación de recursos, gastos energéticos, destrucción de hábitats naturales y paisajes, contribuyendo a la sostenibilidad del planeta y reduciendo impactos ambientales negativos que aceleran el cambio climático, que hoy en día se aprecia con más relevancia que en años anteriores.

1.2. Trabajos previos

1.2.1. Nivel internacional

Un, Onpeker y Ozel (2017, p. 197) en su investigación titulada “The treatment of chromium containing wastewater using electrocoagulation and the production of ceramic pigments from the resulting sludge”, cuyo objetivo general fue desarrollar un proceso de desperdicio cero y la minimización de la contaminación, reutilizando los lodos generados por los recursos. Para lo cual utilizaron una muestra procedente de los efluentes de una instalación de galvanoplastia cuyas características fueron contenido en cromo (VI) de 1000 mg/L, una conductividad eléctrica 4.2 mS/cm y un pH de 2.4; esta muestra fue tratada en un reactor de con una capacidad de 173 mL. Los tratamientos que se aplicaron consistieron en tres niveles de pH (2.4, 4 y 6), cuatro niveles de densidad eléctrica (5, 10, 15 y 20 mA/cm²) y concentración de electrolito en 3 niveles (0.05, 0.1 y 0.15 M de NaCl). Los resultados óptimos encontrados fueron a un pH de 2.4, una densidad eléctrica de 20 mA/cm² y una concentración de NaCl de 0.05 M, con lo cual se obtuvo una remoción de casi el 100% al cabo de 20 minutos.

Arboleda y Herrera (2015, p. 13), en su investigación “Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo batch para la remoción de cromo (VI) con electrodos de aluminio – aluminio y hierro – aluminio en condiciones de laboratorio”, en el cual se propusieron a evaluar la remoción de cromo (VI) por electrocoagulación, para esto se utilizó un reactor discontinuo con capacidad de 1.9 L con cuatro electrodos (aluminio y hierro) y una muestra de 1 L la cual consistió en una solución sintética de cromo (VI) a 10 mg/L. Los tratamientos llevados a cabo consistieron en la variación del tipo del material de electrodos (Al-Al-Al, Fe-Fe-Fe-Fe y Al-Fe-Al-Fe) y su variación de la distancia de separación entre ellos (5mm, 10mm y 15mm); también se varió el valor de pH inicial (4, 6 y 8). Las muestras fueron tomadas a los 10, 20, 30 y 40 minutos. El mejor porcentaje de remoción fue del 99% a un valor de pH inicial de 8, una separación de electrodos de aluminio de 5 mm y un tiempo de residencia de 40 minutos.

El-Naas y Hamdan (2014, p. 74), en su investigación “Removal of hexavalent chromium from groundwater by continuous electrocoagulation”, en el cual se plantearon como objetivo evaluar el rendimiento de electrocoagulación en un modo de agitación continua para la remoción de cromo (VI) de aguas subterráneas, para ello se utilizó un reactor de 1L de capacidad con electrodos metálicos con una superficie de 63 cm^2 ; con un flujo de entrada y salida de forma continua y una muestra de aguas subterráneas. En este experimento se evaluaron los efectos del tipo de material de electrodos de aluminio y hierro en cuatro combinaciones (Fe-Fe, Fe-Al, Al-Al y Al-Fe); los efectos de tres velocidades de flujo de entrada (30, 90 y 150 mL/min); los efectos de cinco densidades de corriente (1.59, 4.76, 7.94, 11.11 y 15.87 mA/cm^2); así mismo también se evaluaron cinco concentraciones iniciales de cromo hexavalente (0.2, 1, 5, 20 y 100 mg/L). El mejor tratamiento removió casi el 100% de cromo hexavalente, y se dio con un flujo de entrada de 90 mL/min, un pH inicial de 8, una densidad eléctrica de 7.94 mA/cm^2 y con electrodos de hierro en su forma Fe-Fe; todo ello en un tiempo de cinco minutos, con un gasto energético de 0.80 kWh/m^3 .

Gil (2012, p. 14), en su investigación “Tratamiento electroquímico para la remoción de metales pesados en residuos líquidos peligrosos generados en los laboratorios de docencia de la Universidad del Cauca”, cuyo objetivo fue proponer un procedimiento de electrodeposición para la remoción de cromo (VI) y plata (I) presentes en residuos líquidos peligrosos, utilizando un equipo de prueba de jarras, en el cual fueron adaptadas dos celdas electrolíticas de 2L de capacidad cada una con electrodos de zinc como ánodo y cobre como cátodo; conectadas por un puente salino. La muestra que se trató consistió en 2L de soluciones sintéticas de sales de dicromato de potasio y nitrato de plata. Los tratamientos llevados a cabo en el proceso consistieron en las variaciones de la concentración inicial de cromo y plata (50 y 150 mg/L) y los valores iniciales de pH (0.5 y 2). El mayor porcentaje de remoción de cromo (VI) fue de 95%, el cual fue dado con una concentración inicial de 150 mg/L, pH inicial de 0.5 y en un tiempo de 3 horas. Para la plata fue se obtuvo un 34% de remoción, la cual

fue la máxima y se obtuvo con una concentración inicial de 150 mg/L, pH de 2 y en un tiempo de 30 minutos.

Akbal y Camci (2010, p. 214), en su investigación “Copper, chromium and nickel removal from metal plating wastewater by electrocoagulation”, cuyo objetivo principal fue evaluar la eficiencia de electrocoagulación en la eliminación de cobre, cromo y níquel de las aguas residuales de una planta de galvanoplastia. Para esto se utilizó un reactor de capacidad de 1.8L, en el cual se acondicionaron celdas de aluminio y hierro de 45 mm altura, 75 mm de ancho y 3 mm de espesor; y una muestra de 650mL cuyas características fueron Cu 45 mg/L, Cr 44.5 mg/L, Ni 394 mg/L, pH 3 y conductividad de 2 mS/cm. Los parámetros manipulados para este proceso consistieron en la densidad eléctrica en cuatro niveles (2.5, 5, 7.5 y 10 mA/cm²); el pH inicial en cuatro niveles (3, 4, 7, 9) y la conductividad eléctrica en tres niveles (2, 4 y 6mS/cm); también se varió el tipo de material de electrodos de cuatro maneras Al-Fe, Fe-Al, Al-Al y Fe-Fe. La configuración óptima del proceso consistió en la variación del tipo de electrodos en su forma Fe-Al, la densidad eléctrica de 10 mA/cm², la conductividad eléctrica de 6mS/cm y el pH inicial de 3. Lográndose de esta manera una remoción del 100% de los metales en estudio en un tiempo de 20 minutos.

Morales y Acosta (2010, p. 33), en su investigación “Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas”, cuyo objetivo fue valorar y optimizar un prototipo existente en la Universidad Militar Nueva Granada, para la remoción de cromo (VI), plomo y zinc de aguas residuales de galvanoplastia. Para lo cual se utilizó un reactor de capacidad de 10 L con 10 L de agua residual de la empresa Compañía Eléctrica Ltda, para completar el sistema se acondicionaron electrodos de cobre como cátodos y aluminio como ánodos con una separación entre ellos de 6 cm; cabe mencionar que la superficie de las placas de los electrodos fue de 176 cm². Después de haber realizado el proceso se obtuvieron porcentajes de remoción los cuales fueron, para el Cr un 51.65%, Ni un 18.09%, Pb un 50% y Zn un 47.37% de los cuales solo el cromo llega a cumplir con las normas colombianas establecidas. Por otro lado el Cu tuvo un aumento del 519.48% debido a la placa

empleada. Este proceso finalizó con un pH de 3.18, una conductividad de 21.83 mS/cm y una temperatura de 48.5°C.

Mahvi, Naseri y Mesdaghinia (2006, p. 59), en su investigación “Performance evaluation of electrocoagulation process for removal of chromium (VI) from synthetic chromium solutions using iron and aluminium electrodes”, cuyo objetivo planteado fue evaluar el rendimiento de la electrocoagulación con ánodos de sacrificio de hierro y aluminio para la eliminación de cromo (VI). Para esto se utilizó un reactor 1L de capacidad efectiva, en la cual se acondicionaron cuatro electrodos a una distancia de 1.5 cm. Para la determinación de la configuración óptima en este proceso se manipularon varios parámetros como el tipo de material de los electrodos, la cual se varió dos veces (Al-Al-Al-Al y Fe-Fe-Fe-Fe); el pH inicial, también variado tres veces (3, 7 y 10); el voltaje, de la misma forma tres veces (de 20, 30 y 40 voltios); y por último la concentración inicial de cromo (VI) en la muestra sintética (5, 50 y 500 mg/L). Con estos tratamientos se consiguió determinar que la configuración óptima para este proceso fue utilizando electrodos de hierro, pH inicial de 3, voltaje de 40, y con concentración inicial en la muestra de cromo (VI) de 50 mg/L, en un tiempo de 60 minutos. Lográndose así remover el 99.998% de cromo (VI).

1.2.2. Nivel nacional

Humpire (2017, p. 13), en su investigación “Efecto del pH y tiempo en la depuración de lactosuero residual por electrocoagulación”, cuyo objetivo principal fue evaluar el efecto del pH y tiempo de tratamiento por electrocoagulación en los parámetros físico-químicos del lactosuero residual con las normas nacionales. Para esto se utilizó un reactor de 2 L, en el cual se acondicionó electrodos de aluminio y hierro ubicados de forma bipolar, con una superficie de 30 cm² cada uno y con una separación de 1 cm entre ellos. Las variables manipuladas en este proceso fueron el pH inicial (2, 3, 6, 9 y 10) y el tiempo (6, 10, 20, 30 y 35 minutos), bajo estas condiciones establecidas se determinó que el tiempo óptimo es de 30 minutos y el pH inicial óptimo es de 6 unidades. Por otro lado cabe mencionar que inicialmente al lactosuero depurado se le determinó los parámetros físicoquímicos cuyos valores son de 264.85g/L de DQO, turbiedad de 3600 UNT y luego del tratamiento de

depuración también se le evaluó nuevamente estos parámetros, obteniéndose como resultado el 80% y el 91% en la reducción de DQO y turbiedad respectivamente.

Aguilar (2015, p. 12), en su investigación “Evaluación de la eficiencia de un celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua”, se planteó como objetivo, determinar la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de aguas, para esta investigación se utilizó un reactor de electrocoagulación con una capacidad de tratamiento 4.5 L de agua residual, con 10 electrodos, 5 de aluminio (ánodo) y 5 de hierro (cátodo), los cuales cuentan con un área de 100 cm² cada uno, con una separación de 10 mm entre ellos, la muestra fue que se trabajó en dicho reactor fue preparada de manera artificial hasta 660 UNT. Siguiendo con el proceso, los tratamientos consistieron en la variación de pH inicial (4, 7 y 10) y la variación de la intensidad eléctrica (3, 5 y 8 A). Con esto se pudo obtener los parámetros óptimos que influyen en el proceso, los cuales fueron pH inicial de 5 e intensidad eléctrica de 5 A; esto en un tiempo de tratamiento de 15 minutos, lográndose de esta manera una remoción del 87% de UNT.

Porto (2014, p. 10), en su investigación que tiene por título “Evaluación de la remoción de arsénico por electrocoagulación de aguas mineras”, se planteó como objetivo evaluar la remoción del arsénico por electrocoagulación de aguas mineras. Para esta investigación se construyó un reactor de operación batch de medidas 12x10x120cm, con electrodos: 3 cátodos de aluminio y 2 ánodos de acero inoxidable, contando con un área de 288 cm². La muestra que se trabajó en este reactor fue de aguas abajo de un lavadero de oro de una zona minera Anenea. La configuración del proceso consistió en la manipularon los siguientes parámetros como el tiempo de electrocoagulación (10, 15 y 20 minutos) y la densidad de corriente aplicada (3.5, 5.25 y 7 mA/cm²). Posteriormente se obtuvo una remoción del 92.8% de arsénico en un tiempo de 15 minutos y una densidad eléctrica de 5.25 A/cm².

Pantoja (2014, p. 8), en su investigación, “Reducción de la concentración de hierro en agua, mediante la electrocoagulación”, tuvo como objetivo reducir la

concentración de hierro en agua mediante la electrocoagulación, para esto se utilizó un reactor con electrodos de aluminio cuya capacidad fue de 0.8 L y una muestra sintética de 16 ppm de fierro. El diseño experimental consistió en la manipulación de 3 variables con 3 niveles de estudio, los cuales fueron pH inicial de la solución (6, 7 y 8), la densidad de corriente (10, 20 y 30 A/m²) y el tiempo que fue cada 4 minutos en un rango de 0 a 16. El mejor resultado para la reducción del hierro se obtuvo a un pH 8, un tiempo de 4 minutos y una densidad de corriente de 30 A/m², cuyo porcentaje de remoción fue de un 88.76%.

1.2.3. Nivel regional

Arévalo (2016, p. 13), realizó una investigación cuyo título fue “Influencia de la densidad de corriente y el tiempo de residencia en la reducción de arsénico de efluentes artificiales mediante el proceso de electrocoagulación” como objetivo planteado fue determinar la influencia de la densidad de corriente y el tiempo de residencia, sobre el porcentaje de reducción del arsénico en solución acuosa, mediante el método de electrocoagulación, en el cual se utilizaron ánodos de aluminio en serie y cátodos de acero en un reactor de electrocoagulación de 3 L de capacidad, para poner en marcha el reactor se preparó una muestra de 15.02 ppm de arsénico (III). En el diseño experimental manipularon dos variables en cuatro niveles cada una, las cuales fueron el tiempo de electrocoagulación (15, 30, 45 y 60 minutos) y la densidad eléctrica (10, 20, 30 y 40 mA/cm²). La máxima remoción fue de 99.2% y se obtuvo en un tiempo de 45 minutos y a una densidad eléctrica de 40 mA/cm².

1.3. Teorías relacionadas al tema

1.3.1. El cromo

El cromo es metal, que se encuentra de forma natural en las rocas, animales, plantas; la cromita (FeCr₂O₄) es su presentación principal (Diccionario de Ciencias, 2000, p. 276). Este metal tiene varios estados de oxidación que van desde ion +1 hasta el ion +6, pero mayormente se encuentran en forma trivalente o hexavalente (Albert, 1997, p. 227).

Cromo (III): El cromo en estado de oxidación +3 se encuentra como una sal cristalina de color verde, conocida como óxido de cromo (III), que a condiciones normales de ambiente es insoluble en el agua; sin embargo en medios líquidos donde el pH es bajo se puede disolver dando iones de cromo (III) y en pH altos o soluciones alcalinas produce cromita (Diccionario de Ciencias, 2000, p. 276). El óxido crómico u óxido de cromo (III) Cr_2O_3 mayormente se utiliza como pigmento verde ya que es muy estable, resistente a la corrosión y de alto punto de fusión (Albert, 1997, p. 229).

Cromo (VI): Óxido de cromo (VI) o trióxido de cromo, es el estado de oxidación del cromo más inestable y extremadamente oxidante, se le puede encontrar como un compuesto de polvo negro insoluble y un compuesto rojo, pierde oxígeno a temperaturas aproximadas a 400°C reduciéndose a cromo (III). Por otro lado cabe resaltar que el óxido de cromo (VI) puede llegar a ser inflamable siempre y cuando se encuentre en presencia con el etanol. (Diccionario de Ciencias, 2000, p. 276). Los usos industriales más comunes que se le da al cromo (VI), es en las curtiembres utilizando el dicromato sódico, de otra manera distinta el compuesto de cromato de plomo son utilizados para dar color. (Albert, 1997, p. 229).

1.3.2. El cromo (VI) en soluciones acuosas

El cromo en su forma hexavalente se caracteriza por ser persistente en un medio acuoso con baja carga orgánica, sin embargo puede reducirse a cromo (III) siempre y cuando la solución que lo contiene tenga una alta carga orgánica y se encuentre a pH neutro (Albert, 1997, p. 229).

1.3.3. El cromo (VI) en efluentes industriales

Los residuos líquidos de cromo (VI) son puntuales y de origen industrial que son vertidos en la red de alcantarillado, cuerpos naturales de agua superficial, lo cual pone riesgo la salud humana, la calidad de suelo y agua, la flora y la fauna, por consiguiente esto va alterando los ecosistemas naturales (Sans y De Pablo, 1989, p. 67).

La generación de estos efluentes cargados de cromo (VI) están mayormente a cargo de tres industrias: metalúrgicas, materiales refractarios y químicas. En la primera el cromo es el componente principal en la fabricación de aceros inoxidables; la segunda se utiliza para la fabricación de ladrillos de magnesita, y por último en la industria química se utiliza para operaciones de curtido de pieles, colorantes, anti corrosivos, industria maderera, papel fotográfico, etc. (Albert, 1997, p. 232).

1.3.4. Técnicas para tratar soluciones acuosas de cromo (VI)

Los metales presentes en los residuos, son los únicos constituyentes que no pueden ser convertidos o transformados; es por ello que se necesita convertirlos en su forma más insoluble con el fin de evitar la reincorporación al medio ambiente (Elías et al., 2009, p. 99).

A) Físicas

- Evaporación y destilación.- Este tipo de proceso resulta rentable para efluentes con alta concentración de metales. El agua evaporada se condensa, para luego poder ser reutilizada. La evaporación y destilación suelen utilizarse para la recuperación de Zn, Cu, Ni y Cr procedentes de efluentes galvánicos (Elías et al., 2009, p. 107).
- Separación con membranas.- Se basa en hacer pasar el agua residual a través de una membrana porosa (osmosis inversa o electrodiálisis). Logrando así el pase del agua y reteniendo la disolución que contiene el metal en cuestión, repitiendo el mismo proceso varias veces se logran resultados importantes (Elías et al., 2009, p 104).

B) Químicas

- Métodos electroquímicos.- En esta técnica ocurren reacciones redox, donde los electrones liberados por la corriente eléctrica reduce los iones metálicos depositándose en el cátodo. Estos procesos frecuentemente son utilizados en métodos de inertización en la industria de la minería, refinado de metales, para convertir metales de valencia que son difíciles de precipitar a otros que sean de fácil precipitación, dentro de los cuales la electrodeposición, electrocoagulación, electroflotación (Mollah et al., 2001 en Arboleda y Herrera, 2015, p. 28).
- Técnicas de precipitación.- Consiste en conseguir un sólido de una disolución. Utilizando reactivos precipitantes de metales, estos suelen ser: Ca(OH)_2 , NaOH y

Na_2CO_3 ; también se logra precipitar con sulfuros, pero se evita por ser de carácter tóxico (Elías et al., 2009, p. 108).

C) Biológicas

- Técnicas con biomasa.- Consiste en dos tipos diferentes por microorganismos vivos o inertes. En el primero se emplea microorganismos como bacterias, algas y hongos, quienes son capaces de fijar y bioacumular los metales. El segundo se conoce como biosorción la cual consiste en la fijación de metales en las en la biomasa que esta inactiva (Volesky, 1990 en Valderrama, 1998, p. 74).

1.3.5. Electrocoagulación

La coagulación asistida electroquímicamente, es un proceso electroquímico en el que a partir de compuestos procedentes del ánodo, se agrupa la materia coloidal existente en un agua residual, permitiendo su conversión en sólidos suspendidos y su separación del agua mediante técnicas convencionales tales como la decantación, flotación y filtración. Como consecuencia de su disolución los ánodos van desapareciendo conforme transcurre el tratamiento, hasta ser necesaria su reposición (García y Letón, 2012, p. 34).

Mayormente el material anódico que se emplea consiste en planchas de aluminio o hierro. Al aplicar una diferencia de potencial a la celda, se consigue la generación de iones en disolución. Como consecuencia se obtienen:

- Hidróxidos insolubles sobre los que quedan retenidos los contaminantes, los cual son de fácil separación del agua.
- Hidroxocomplejos catiónicos o aniónicos, que anula las fuerzas de repulsión electroestáticas existentes en la materia coloidal, favoreciendo los procesos de floculación.

La aparición de otras especies depende de la concentración total del metal y del pH del agua residual que se esté tratando.

Al formar material coloidal en la electrocoagulación, posibilita también la eliminación de otros contaminantes; dado que los flóculos formados tienen la

capacidad de absorberlos, los cuales pueden ser materia orgánica y cationes metálicos o aniones (García y Letón, 2012, p. 28).

1.3.6. Parámetros para el proceso de electrocoagulación

En el proceso de electrocoagulación existen variables como superficie de electrodos, forma geométrica de la celda, densidad de corriente, naturaleza del voltaje y entre otros que son muy poco mencionados, esto a diferencia de los parámetros típicos como temperatura, pH, etc. influyen de igual medida en la eficiencia de este tipo de tratamiento (García y Letón, 2012, p. 139).

A) Voltaje de celda

Es importante resaltar este punto ya que los costos de operación incrementan cuando se opera a elevadas densidades de corriente, ya que el consumo energético de la celda (W) es directamente proporcional al potencial aplicado (V), en la que j es la densidad de corriente, y A es el área del electrodo (ecuación N°1). La densidad de la corriente determina la cantidad de metal que se libera en el sistema: altas densidades de corriente permiten unidades de electrocoagulación más pequeñas; sin embargo cuando estas son demasiado elevadas, aumenta el consumo de energía eléctrica para la reacción paralela de generación de oxígeno y también la potencia disipada (García y Letón, 2012, p. 139).

$$W = j \cdot A \cdot V$$

B) Conductividad del agua

Cuando este parámetro no es el adecuado, es frecuente la adición de sales, en muchos casos el cloruro sódico es una buena opción. Los iones de cloruro sódico además ayudan a contrarrestar los efectos negativos de aniones como HCO_3^- y SO_4^{2-} . En ese sentido, la existencia de iones bicarbonato y sulfato en el agua a tratar puede conducir a la precipitación de iones de calcio y magnesio, y esto la formación de una capa aislante en los electrodos, lo cual es contraproducente (García y Letón, 2012, p. 140).

C) Tipo de material de electrodos

Es muy importante su selectiva para obtener resultados óptimos, mucho depende del tipo de agua residual a tratar. Aunque comúnmente constan de láminas de

aluminio o hierro. Sin embargo hay que tener en cuenta parámetros importantes para su selección, como es su estabilidad física y química, conductividad y capacidad catalítica (García y Letón, 2012, p. 140).

D) pH

Es un parámetro muy conocido en la influencia que tiene en un tratamiento electroquímico ya que mejora la eficiencia en el proceso de solubilidad del metal sólido para formar los coagulantes hidróxidos. Por otro lado, el pH durante el proceso varía de dos formas dependiendo el valor inicial de la solución a tratar, si es alcalino tiende a bajar, pero si es ácido tiende a incrementarse. Es por eso que se supone que el pH óptimo para el tratamiento electroquímico tiende ser neutro (Zurita, 2012 en Arévalo 2016, p. 33).

1.4. Formulación al problema

¿Influye el pH y el tiempo en la remoción del cromo hexavalente presente en soluciones acuosas utilizando electrocoagulación con electrodos de aluminio?

1.5. Justificación del estudio

En la presente investigación se da una posible propuesta de tratamiento de aguas, que ayude a minimizar los problemas actuales de contaminación que afronta el recurso hídrico por parte de las industrias que utilizan cromo en sus procesos, ya que el cuidado de la calidad del agua es de vital importancia, porque garantiza la existencia de vida en todo el planeta.

Es por eso que en esta investigación se aplicó y se demostró que la electrocoagulación es eficiente y sirve para el tratamiento de aguas contaminadas, en este caso, con cromo hexavalente. Trabajos realizados anteriormente y por revisión de teoría en libros, demuestran que es una tecnología amigable con el ambiente, teniendo más ventajas que desventajas.

Industrias importantes en la ciudad de Trujillo como es el caso de las curtiembres generan efluentes con mínimas cantidades de cromo hexavalente, en las cuales existe la posibilidad de que estas aguas superen los parámetros establecidos de este contaminante en la

normativa peruana vigente, y esto puede que suceda, debido a que no cuentan con un sistema de tratamiento de aguas residuales que permitan la remoción de dicho metal.

El beneficio de la aplicación de esta tecnología brinda la posibilidad de poder reutilizar el recurso hídrico en los procesos o cuanto menos darle un tratamiento optimo a sus efluentes, que vaya acorde con las normas y sobre todo que, garantice un respeto por la población y el medio ambiente.

Por último, esta investigación pretende contribuir con futuras investigaciones que tengan el mismo perfil, puesto que este tipo de tratamiento puede aplicar para la remoción, no de solo metales pesados; sino también de materia orgánica. Y de esta manera optimizar sus parámetros de esta tecnología y sea útil para efluentes de distintas características.

1.6. Hipótesis

El pH y el tiempo influyen en la remoción del cromo hexavalente presente en soluciones acuosas utilizando la electrocoagulación con electrodos de aluminio

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo general

- Demostrar si el pH y el tiempo influyen en la remoción de cromo hexavalente presente en soluciones acuosas utilizando electrocoagulación con electrodos de aluminio.

1.7.2. Objetivos específicos

- Realizar el procedimiento de electrocoagulación en tres niveles de pH, manteniendo las otras variables como constantes, determinando el valor óptimo de operación.
- Realizar el procedimiento de electrocoagulación a tres niveles de tiempo, para determinar el tiempo óptimo de operación.
- Determinar el grado de remoción de cromo hexavalente de una solución acuosa a valor de pH y tiempo óptimo.

II. METODO

2.1. Diseño de investigación

2.1.1. Tipo de investigación

- Por su finalidad se entiende que es una investigación aplicada porque busca plasmar las nuevas teorías y convertirlos en productos (Cegarra, 2012, p. 14).
- El tipo de fuente en este caso sería de laboratorio o gabinete, porque no es necesario tener contacto con el exterior para la recolección de datos (Blaxter, Hughes y Tight, 2000, p. 90).
- Es de enfoque cuantitativo sigue una serie de pasos en orden, no se puede saltar ni omitir ningún paso (Hernández, Fernández y Baptista; 2010, p. 90).
- El tipo de diseño de investigación es experimental debido a que el investigador va a manipular una causa para generar un efecto (Hernández, Fernández y Baptista, 2010, p. 121).
- Por el tipo de alcance trata de una investigación explicativa, la cual determina y explica los fenómenos ocurridos y la influencia de las variables (Hernández, Fernández y Baptista, 2010, p. 85).

2.1.2. Diseño experimental

Tabla 1. *Sub variables de las variables independientes*

Sub-variables	T₁	T₂	T₃	Total combinado
P₁	P ₁ T ₁	P ₁ T ₂	P ₁ T ₃	3(P ₁)
P₂	P ₂ T ₁	P ₂ T ₂	P ₂ T ₃	3(P ₂)
P₃	P ₃ T ₁	P ₃ T ₂	P ₃ T ₃	3(P ₃)
Total combinado	3(T ₁)	3(T ₂)	3(T ₃)	3x3

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 2. *Replicas y combinaciones de tratamientos*

	P₁T₁	P₁T₂	P₁T₃	P₂T₁	P₂T₂	P₂T₃	P₃T₁	P₃T₂	P₃T₃	COM
M₁	P ₁ T ₁ M ₁	P ₁ T ₂ M ₁	P ₁ T ₃ M ₁	P ₂ T ₁ M ₁	P ₂ T ₂ M ₁	P ₂ T ₃ M ₁	P ₃ T ₁ M ₁	P ₃ T ₂ M ₁	P ₃ T ₃ M ₁	9(M ₁)
M₂	P ₁ T ₁ M ₂	P ₁ T ₂ M ₂	P ₁ T ₃ M ₂	P ₂ T ₁ M ₂	P ₂ T ₂ M ₂	P ₂ T ₃ M ₂	P ₃ T ₁ M ₂	P ₃ T ₂ M ₂	P ₃ T ₃ M ₂	9(M ₂)
M₃	P ₁ T ₁ M ₃	P ₁ T ₂ M ₃	P ₁ T ₃ M ₃	P ₂ T ₁ M ₃	P ₂ T ₂ M ₃	P ₂ T ₃ M ₃	P ₃ T ₁ M ₃	P ₃ T ₂ M ₃	P ₃ T ₃ M ₃	9(M ₃)
COMB	3(P ₁ T ₁)	3(P ₁ T ₂)	3(P ₁ T ₃)	3(P ₂ T ₁)	3(P ₂ T ₂)	3(P ₂ T ₃)	3(P ₃ T ₁)	3(P ₃ T ₂)	3(P ₃ T ₃)	9x3

Fuente: Elaboración propia, 2018

Donde:

P: Nivel de pH

T: tiempo en minutos

P₁: pH 3

T₁: 5 minutos.

P₂: pH 5.5

T₂: 10 minutos

P₃: pH 8

T₃: 15 minutos

A partir de estos cruces de variables y las repeticiones se obtuvo 27 unidades de experimentales.

2.2. Variables, operacionalización

2.2.1. Variables

a) Variable independiente

- pH inicial de la solución acuosa de cromo hexavalente.
- Tiempo de electrocoagulación.

b) Variable dependiente

- Remoción de cromo hexavalente

2.2.2. Operacionalización de variables

Tabla 3. Operacionalización de variables

Influencia del pH y el tiempo en la remoción de cromo hexavalente utilizando electrocoagulación con electrodos de aluminio				
Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicador
Independiente				
pH inicial de la solución	Es el negativo del logaritmo de la concentración de iones hidronio que se generan cuando sucede la ionización de un soluto presente en una solución (Rodríguez y Marín, 1991, p. 22)	Es el valor que define el carácter ácido, básico o neutro de la solución acuosa de cromo hexavalente a utilizar durante el proceso de electrocoagulación	Ácido	$0 \geq \text{pH} < 7$
			Neutro	$\text{pH} = 7$
			Base	$7 > \text{pH} \leq 14$
Tiempo de electrocoagulación	EL tiempo es aquella magnitud física que transcurre en un solo sentido y sin pausas; sin embargo la rapidez que con que fluye varía dependiendo de la velocidad, esto se basa en la teoría de la relatividad (Lleó y Lleó, 2008, p. 107)	El tiempo magnitud física cronometrado por un temporizador para una mayor precisión de la operación.	Tiempo del proceso de electrocoagulación	Minutos
Dependiente				
Cromo hexavalente	Es un agente oxidante extremadamente fuerte, especialmente para la materia orgánica; inflama rápidamente con el etanol. Es un óxido ácido y se disuelve en agua formando ácido crómico (Diccionario de Ciencias, 2000, p. 276).	Metal pesado se analiza por un espectrofotómetro de absorción atómica mediante una curva de calibración.	Concentración inicial concentración final porcentaje de remoción	ppm Cr^{+6} %

Fuente: Elaboración propia, 2018

2.3. Población y muestra

2.3.1. Población

En esta investigación la población estuvo compuesta por soluciones acuosas de cromo hexavalente a una concentración de 20 ppm.

2.3.2. Muestra

La muestra estuvo constituido por 9 litros de la solución acuosa de 20 ppm de cromo hexavalente.

2.3.3. Unidad de análisis

La unidad de análisis estuvo constituido por un litro de 20 ppm de cromo hexavalente.

2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad

2.4.1. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La observación fue la técnica que se empleó en la recolección de los datos y el instrumento donde se recolectó la información consistió en una ficha de observación.

2.4.2. Validez y confiabilidad del instrumento

Para la seguridad de la validez y confiabilidad del instrumento utilizado se tuvo en cuenta las opiniones de expertos.

2.5. Métodos de análisis de datos

Los datos que se obtuvieron fueron procesados por el software Microsoft Excel, haciendo uso de la función estadística de análisis de varianza, el cual sirvió para distinguir la diferencia en los tratamientos que se realizaron en esta investigación. Luego se aplicó la función TUKEY, el cual dio a conocer el mejor tratamiento.

2.6. Aspectos éticos

El presente proyecto de investigación contiene teorías de libros y datos de investigaciones de distintos autores, los cuales están debidamente citados, respetando siempre la propiedad intelectual de cada uno de ellos. La información recopilada de las investigaciones citadas sirvieron para optimizar el proceso de electrocoagulación; ya que las variables que se manipularon y el diseño de experimentos fueron distintos al resto de

investigaciones, con lo cual se da fe que la información generada es inédita. Cabe resaltar que el proceso de electrocoagulación para la remoción de cromo hexavalente en Perú es poco estudiado, pues mayormente están relacionadas a la remoción de materia orgánica y otros metales.

Por otro lado, los materiales y equipos fueron debidamente calibrados por profesionales expertos, además, también, se contó con el debido asesoramiento para el desarrollo experimental de esta investigación, lo cual garantiza la confiabilidad de los datos que se generaron en esta investigación.

Para finalizar, en esta investigación durante su desarrollo se hizo un uso eficiente de los recursos y se preservó ante todo el cuidado al medio ambiente, realizando un manejo adecuado de los residuos peligrosos evitando de esta manera que dichos residuos tengan contacto con los recursos hídricos y edafológicos.

III. RESULTADOS

En el presente capítulo se detalla los resultados obtenidos después del tratamiento de las muestras, producto del cruce de variables manipuladas como el tiempo y el pH. Así como también, los análisis estadísticos de los datos.

Tabla 4. Remoción media de cromo (VI)

Tiempo (min)	remoción media de Cromo (ppm Cr ⁶⁺)		
	pH 3	pH 5.5	pH 8
5	14.7387	12.5494	10.1415
10	18.6870	17.2875	15.7581
15	20.0652	19.0701	18.1348

Fuente: Elaboración propia, 2018

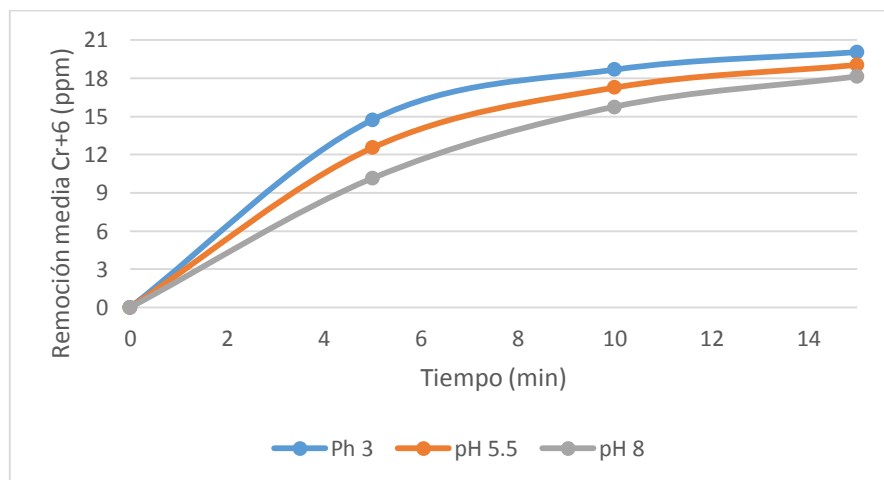


Figura 1. Influencia del pH en la remoción de cromo (VI) respecto al tiempo

En el gráfico de la figura 1 se observan tres líneas que indican tres pH diferentes, también se observan que tienen forma ascendente en función del tiempo, con lo cual se deduce que la remoción es directamente proporcional al tiempo. Así mismo, se aprecia que la línea del pH 3 se encuentra por encima de las líneas del pH 5.5 y pH 8, lo cual indica que presenta la mayor remoción.

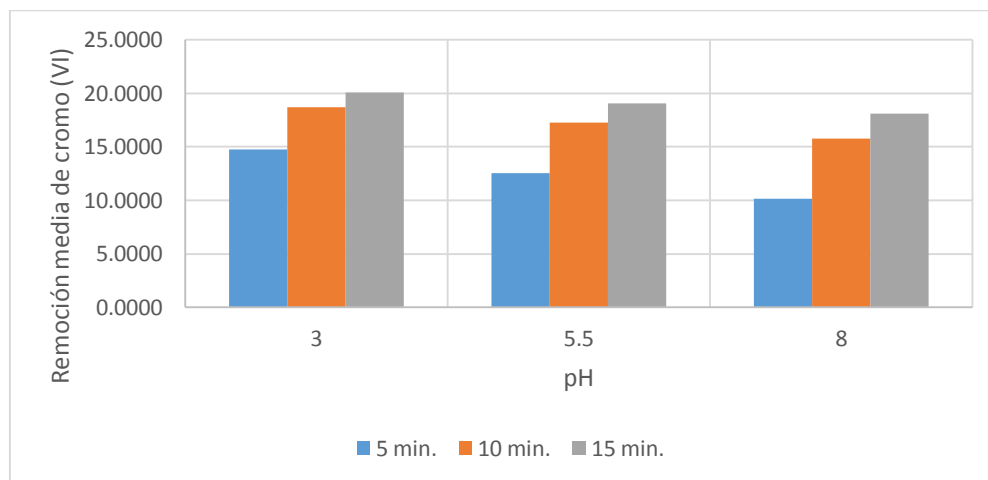


Figura 2. Remoción media de cromo con respecto al pH a diferente tiempo

En el gráfico de la figura 2 se observa como la remoción de cromo (VI) se comporta en forma ascendente, agrupándose los intervalos de tiempo de acuerdo al nivel pH. Se observa también que las barras del pH 3 en el minuto 15, se aproxima a una remoción cercana a la totalidad de la concentración inicial (20.5917 ppm Cr⁺⁶).

Tabla 5. *Porcentaje de remoción de cromo*

Tiempo (min)	Porcentaje de remoción (%)		
	pH 3	pH 5.5	pH 8
5	71.58	60.94	49.25
10	90.75	83.93	76.53
15	97.44	92.61	88.07

Fuente: Elaboración propia, 2018

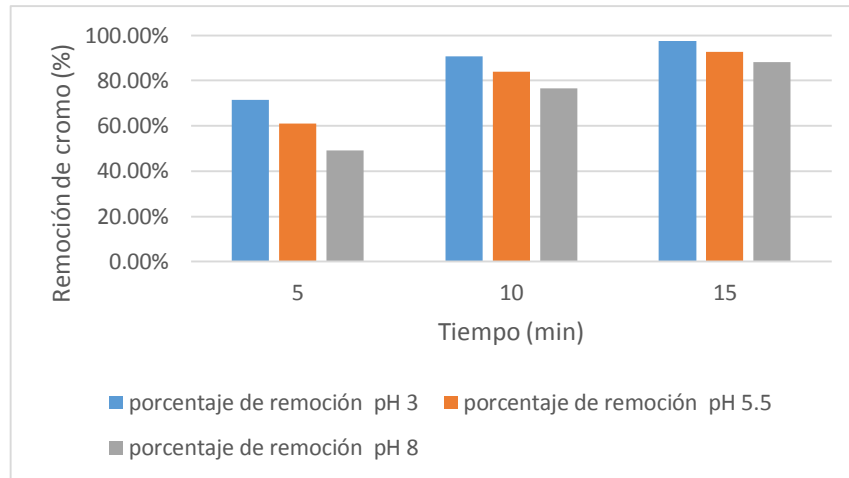


Figura 3. Porcentaje de remoción de cromo (VI)

En la presente figura 3, se muestran los datos de la tabla 5, los cuales muestran los porcentajes de remoción para cada tiempo y pH. En el cual se aprecia que a valor de pH 3 y en el minuto 15, la remoción es la más próxima al 100%.

3.1. Prueba estadística paramétrica

3.1.1. Comprobación de los supuestos

a) Pruebas de normalidad para el factor pH

De acuerdo con las prueba aplicada de K – S, se afirma con un 95% de confiabilidad que los datos de la remoción de cromo según la variable independiente pH presentan distribución normal, debido a que el valor de significancia es mayor al “ α ” ($p > 0.05$), como se puede verificar en el anexo 8.

b) Prueba de normalidad para el factor tiempo

De acuerdo con las prueba aplicada de K – S, se afirma con un 95% de confiabilidad que los datos de la remoción de cromo según la variable independiente tiempo presentan distribución normal, debido a que el valor de significancia es mayor al “ α ” ($p > 0.05$), como se puede verificar en el anexo 9.

c) Prueba de Levene para las varianzas de las muestras.

De acuerdo con la prueba aplicada de Levene, se afirma con un 95% de confiabilidad que los datos de la remoción de cromo según las variables independientes pH y tiempo presentan varianzas homogéneas, debido a que el valor de significancia es mayor al “ α ” ($p > 0.05$), como se muestra en el anexo 10.

d) Linealidad e independencia de las observaciones.

En la figura se puede discernir el cumplimiento los supuestos de linealidad, independencia como se puede verificar en el anexo 11.

3.1.2. ANOVA factorial

Tabla 6. *Análisis de varianza de dos factores*

Pruebas de efectos inter-sujetos					
Variable dependiente:	cromo				
Origen	Suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	259,785 ^a	8	32.473	123.8	.000
Interceptación	7146.912	1	7146.912	27250.8	.000
pH	44.726	2	22.363	85.3	.000
Tiempo	209.593	2	104.797	399.6	.000
pH * Tiempo	5.466	4	1.366	5.2	.006
Error	4.721	18	.262		
Total	7411.417	27			
Total corregido	264.505	26			

a. R al cuadrado = ,982 (R al cuadrado ajustada = ,974)

Fuente: Elaboración propia, 2018

Efecto pH: $\begin{cases} H_0: \text{La media del pH en cada grupo es la misma.} \\ H_1: \text{La media del pH en cada grupo es distinto.} \end{cases}$

Efecto tiempo: $\begin{cases} H_0: \text{La media del tiempo en cada grupo es la misma.} \\ H_1: \text{La media del tiempo en cada grupo es distinto.} \end{cases}$

Interacción pH*tiempo: $\begin{cases} H_0: \text{no hay interacción entre las variables pH y el tiempo.} \\ H_1: \text{si hay interacción entre las variables pH y el tiempo.} \end{cases}$

De acuerdo con la prueba aplicada de análisis de varianza (ANOVA) de dos factores, se afirma con un 95% de confiabilidad que si hay diferencia de media entre el pH y tiempo y la interacción de ambos, debido a que el valor de significancia es mayor al α ($p > 0.05$).

Posteriormente a esta prueba (ANOVA) se realizó una prueba post hoc de acuerdo a tres autores (Tukey, Duncan y Scheffe) para ver en que grupos es donde existe diferencia de las medias y se discernió el mejor tratamiento.

3.1.3. Prueba post hoc

Se aplicó las pruebas post hoc para la determinación de los niveles de pH y tiempo óptimos, para la remoción de cromo (VI) utilizando la electrocoagulación.

a) Prueba post hoc para el factor pH

En el anexo 12 muestra las pruebas de Tukey, Duncan y Scheffe, donde se aprecia que el mejor tratamiento para la remoción de cromo es a pH 3. Estos resultados también se pueden verificar en la tabla de comparaciones múltiples para el factor tiempo (anexo 14).

b) Prueba post hoc para el factor tiempo

En el anexo 13 muestra las pruebas de Tukey, Duncan y Scheffe, donde se aprecia que el mejor tratamiento para la remoción de cromo se da en 15 minutos. Estos resultados también se pueden verificar en la tabla de comparaciones múltiples para el factor tiempo (anexo 15).

IV. DISCUSIÓN

- De la tabla 5 y figura 3, se muestra que a partir de en un tiempo de 15 minutos y un nivel de pH 3 y los demás parámetros constantes (anexo 5), se logra una remoción de aproximadamente del 97.44%. Estos resultados coinciden con la investigación de Un, Onpeker y Ozel (2017), en la cual reportan valores de remoción cercanas al 100% de una concentración inicial de 1000 ppm de cromo (VI) con los siguientes parámetros: un pH de 2.4, un tiempo de 20 minutos y 0.005 M de NaCl. Por lo tanto, se puede decir que ambas investigaciones fueron realizadas en pH ácido y con la misma concentración molar del electrolito cloruro de sodio
- Los valores de remoción mostrados en la tabla 5 de la presente investigación, llegan casi el 97.44%, y se logra a pH 3 en 15 minutos. Sin embargo, según Arboleda y Herrera (2015) en su investigación consiguieron remover 99% de cromo (VI) de acuerdo con sus parámetros iniciales óptimos encontrados como: pH 8, tiempo de 40 minutos y 4 electrodos de aluminio. Por un lado, se coincide en el tipo de material de electrodos utilizados; sin embargo, no se coincide con el nivel de pH inicial y tampoco con el tiempo de electrocoagulación. Por otro lado, en la tabla 5 muestra también que a pH 8 se logra remover un 88.07% de cromo, mientras que la investigación en discusión a ese mismo pH se obtuvo un 85% de remoción a un tiempo de 20 minutos. Quizá esta diferencia se deba a la intensidad de corriente y al voltaje utilizado en la celda.
- En la tabla 10 (anexo 5), se muestran los parámetros constantes del sistema de electrocoagulación, donde se menciona que la celda estuvo configurada con una densidad eléctrica de 6.614 mA/cm^2 , quiere decir que todos los tratamientos se llevaron a cabo con la misma densidad eléctrica; obteniendo así, un 97.44% de remoción a pH y tiempo óptimo. Esta densidad eléctrica se aproxima a la encontrada por El-Naas y Hamdan (2014), quienes removieron cromo (VI), a partir de diferentes densidades eléctricas (1.59, 4.76, 7.94, 11.11, 15.87 mA/cm^2) de las cuales la óptima fue 7.94 mA/cm^2 ; Sin embargo, ellos obtuvieron remociones cercanas del 100% en 5 minutos a pH 8; mientras que en la presente investigación se obtuvo 49.25% (tabla 5) de remoción

a cuyos mismos valores de pH y tiempo. De manera que no coinciden en el porcentaje de remoción cromo, a pesar de que en ambas investigaciones se hayan trabajado con parámetros iniciales parecidos; sin embargo, esta diferencia se deba a la conductividad eléctrica de la solución tratada, ya que no tienen la misma procedencia. Debido a que las muestras de la investigación en discusión provienen de aguas subterráneas, en cambio, la de la presente investigación proviene de soluciones preparadas, por lo que se pudo controlar las concentraciones de electrolitos y por tanto su conductividad.

- Como se muestra en la figura 2, la remoción es mayor a un pH 3 a los 15 minutos, acercándose a valores cercanos al 100%. Con estos datos obtenidos y con la prueba estadística de análisis de varianza (tabla 6) queda demostrado que el pH, influye en la remoción de cromo utilizando la electrocoagulación. Comparando con la investigación de Gil (2012), cuyo sistema de tratamiento consistió en conectar dos celdas electrolíticas (ánodo: zinc y cátodo: cobre) por medio de un puente salino, en donde manipula el pH en dos valores (0.5 y 2) para remover cromo (VI) de una concentración inicial de 150 ppm, donde obtiene efectos positivos con el pH 0.5 y cuyo tiempo óptimo fue de 3 horas. Con lo cual se puede decir coincide al decir que a menor pH mayor remoción. Sin embargo no se puede afirmar lo mismo con la variable tiempo.
- En la prueba de análisis de varianza (tabla 6) y post hoc realizado para el pH (tabla 16) queda comprobado que dicho parámetro influye en la electrocoagulación para la remoción de cromo (VI). Por lo que, se coincide con la teoría expresada por Zurita (2012), en Arévalo (2016); donde se menciona que el pH influye en los tratamientos electroquímicos ayudando a la solubilidad del metal sólido formando hidroxilos. Influencia que se puede apreciar en la figura 2, como es que a menor pH la remoción es mayor en un tiempo determinado, por lo que se coincide con la investigación realizada por Akbal y Canci (2010), cuya remoción obtenida por estos autores fue cerca del 100%, utilizando el mismo valor inicial de pH óptimo de la presente investigación. Resumiendo, ambas investigaciones coinciden en lograr el máximo porcentaje de

remoción a pH 3. De esta manera queda comprobado en que el nivel de pH inicial influye en la remoción de cromo (VI) por electrocoagulación.

- Los valores de la tabla 5 en la presente investigación, coincide con la investigación realizada por Morales y Acosta (2010), donde estos investigadores determinan que el máximo porcentaje de remoción de cromo de 51.65%, fue realizado a un pH inicial de 3.18. Así mismo, cabe mencionar que para dicha investigación se extrajeron muestras de aguas residuales de industrias galvánicas, por lo que se presume que hubo interferencia de otros compuestos que dificultaron su eficacia de la electrocoagulación para la remoción del cromo (VI).
- La presente investigación se llevó a cabo con 5 voltios de manera constante en todos los tratamientos (anexo 5), los únicos parámetros variados fueron el pH y el tiempo (tabla 1). De los cuales se determinó que el pH 3 fue el óptimo y en cuanto al tiempo se percibieron buenos resultados en el minuto 15 (tabla 5). Cuyo nivel de pH inicial óptimo coinciden con la investigación realizada por Mahvi, Naseri y Mesdaghinia (2006), donde se menciona que se obtuvo cerca del 100% de remoción, a un valor de pH 3, tiempo de 60 minutos y a un voltaje de 40. De acuerdo con esto, los porcentajes de remoción son similares en ambas investigaciones utilizando el mismo valor de pH inicial, sin embargo hay diferencia en cuanto al tiempo de tratamiento y al voltaje.
- En la tabla 4 del presente trabajo, muestra valores de remoción de cromo a partir del cruce de variables del pH y el tiempo, para ello, también se realizó la representación gráfica en la figura 1, resaltando mejores resultados de remoción en todos los tres tiempos establecidos para el pH 3 (71.58%, 90.75% y 97.44%). Por otro lado Humpire (2017), mide el efecto del tiempo y el pH para la depuración de lactosuero (DQO y turbiedad), investigación que coincide con las variables independientes de la presente tesis. Este investigador combinó los siguientes valores de pH (2, 3, 6, 9 y 10) y del tiempo (6, 10, 20, 30 y 35 minutos). Producto de esto obtuvo óptimas remociones utilizando el pH 6 en un tiempo de 30 minutos, cuyos valores de remociones para el DQO son del 80% y para la turbiedad del 91%. Esto indica que trabajar en niveles bajos

de pH beneficia cuando se trata de metales pesado; sin embargo por la tesis comprada muestra que, para la remoción de DQO y turbidez el pH optimo tiene que estar cerca de su valor neutro.

- Esta investigación, tiene como variable dependiente la remoción de cromo (VI), cuyos valores reportados se muestran en la tabla 1 respecto a las variables independientes de pH y tiempo. Por otro lado, Porto (2015) trabajó la electrocoagulación con el fin de remover el arsénico de un rio en Puno, para lo cual manipulo el tiempo y la densidad eléctrica, obteniendo porcentajes óptimos de remoción (92.8%) en un tiempo de 15 minutos y con una densidad eléctrica de 5.25 mA/cm². De acuerdo con esto se coincide que sus valores obtenidos de remoción, se aproximan con los que se muestran en la tabla 5 minuto 15, y en cuanto a la otra variable de dicha investigación también existe cierta similitud, ya que en la presente investigación se llegó a utilizar una densidad eléctrica de 6.614 mA/cm² mostrada en tabla 15. Por consiguiente, las comparaciones realizadas muestran que la electrocoagulación funciona de manera exitosa para el tratamiento de estos metales pesados (Cr y As) concordando con la teoría expresada por García y Letón (2012), la cual menciona que este tipo de tratamiento electroquímico es efectivo para varios iones metálicos.
- En la tabla 5 muestra que la máxima remoción obtenida fue a un pH 3 y en un tiempo de 15 minutos. Contrastando con Aguilar (2015), cuya investigación consistía en la remoción de la turbidez (UNT), y para lo cual variaron el pH y la intensidad de corriente, logrando la máxima remoción del 87% de UNT aplicando un nivel de pH de 5 y una intensidad eléctrica de 5 A. Estas comparaciones muestran que valor de pH se maneja de manera distinta según lo que se requiera remover; por lo apreciado en discusiones anteriores para la remoción de iones metálicos el pH se prefiere en valores bajos mientras que para disminuir valores UNT el pH debe de acercarse a su neutralidad.
- Las tablas 16 y 17 muestran que los niveles óptimos para el pH y el tiempo son de 3 y 15 respectivamente, esto se puede apreciar también en la figura 1, donde el pico más alto se ubica en la curva del pH 3 y en un tiempo de 15 minutos figurando un valor de 20.0652

ppm de cromo (VI), el cual representa a su vez el 97.44% de remoción. Por otro lado, se contrasta con la investigación realizada por Pantoja (2014), encontrándose en desacuerdo con los resultados y con los parámetros óptimos del presente trabajo; cabe mencionar que para Pantoja su objetivo fue remover fierro y sus los valores óptimos de sus variables independientes utilizadas fueron: pH 8, tiempo de 4 minutos y densidad de corriente de 30 A/cm², con lo cual logró una remoción del 88.76% de fierro. Estos resultados se contraponen a varias investigaciones mencionadas anteriormente, debido al pH elevado que se utilizó para remover fierro, ya que la mayoría concluye que las máximas remociones se llegan a pH ácido. Sin embargo quizá se deba al alto nivel de densidad eléctrica utilizada.

- La figura 1 muestra la influencia que tiene el tiempo en la remoción de cromo (VI) respecto a sus tres niveles de pH manipulados (3, 5.5 y 8) destacando el pH 3 en el minuto 15 con los valores máximos de remoción, realizando una comparación con el trabajo llevado a cabo por Arévalo (2016), el cual busca la reducción de arsénico (III), para ello trabajo con el tiempo en cuatro niveles (15, 30, 45 y 60 minutos) y con la densidad eléctrica también en cuatro niveles (10, 20, 30 y 40 mA/cm²), de los cuales determino que en 45 minutos y con densidad eléctrica de 40 mA/cm² obtiene un 99.2% de la eliminación de arsénico (III), cabe mencionar que dicho autor no utilizo ayuda de ningún electrolito para aumentar la conductividad eléctrica, ya que es un parámetro importante según lo mencionado por García y Letón (2012).

V. CONCLUSIONES

- El pH y el tiempo influyen en la remoción de cromo hexavalente de soluciones acuosas utilizando la electrocoagulación con electrodos de aluminio.
- En el proceso de electrocoagulación, la remoción de cromo hexavalente presentó que el pH inicial de la solución influye en el tratamiento, obteniéndose a pH 3 los valores máximos de remoción.
- Durante el proceso de electrocoagulación, los valores máximos de remoción se alcanzaron a un tiempo de 15 minutos, en donde los valores experimentales se ajustan a una cinética de pseudo primer orden.
- El máximo valor de remoción de cromo hexavalente fue obtenido a pH 3 en 15 minutos, lo cual fue aproximadamente de 20.0652 ppm, cuyo valor en porcentaje es aproximadamente a 97.44% de remoción.

VI. RECOMENDACIONES

- Evaluar la influencia que ejerce la concentración del cloruro de sodio, en el grado de remoción por electrocoagulación.
- Estudiar la influencia del amperaje y el voltaje, en la mejora de la electrocoagulación usando electrodos de aluminio, a fin de optimizar el proceso.
- Estudiar la influencia del uso de diferentes metales como electrodos en el proceso de electrocoagulación.
- Evaluar el proceso en muestras que procedan de efluentes reales con alto contenido en cromo, a fin comprobar su efectividad con la interacción de otros compuestos.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, Edwar. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. Tesis (Magister en ciencias ambientales con mención en control de la contaminación y ordenamiento ambiental). Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, 2015. 102 pp.

AKBAL, Feryal y CAMCI, Selva. Copper, Chromium and Nickel Removal from Metal Plating Waswater by Electrocoagulation. Turquía: Revista ELSEVIER: 214- 222, noviembre de 2010.

ALBERT, Lilia. Cromo. *En su: Introducción a la toxicología ambiental*. México: Eco, 1997. pp. 227 – 246. ISBN: 9275322333

ARBOLEDA, Juan y HERRERA, Paula. Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo batch para la remoción de cromo hexavalente con electrodos de aluminio - aluminio y hierro - aluminio en condiciones de laboratorio. Tesis (Licenciado en Ingeniería). Bogotá: Universidad Santo Tomás, Faculta de Ingeniería Ambiental, 2015. 107 pp.

AREVALO, César. Influencia de la densidad de corriente y tiempo de residencia en la reducción de arsénico de efluentes artificiales mediante el proceso de electrocoagulación. Tesis (Magister en gestión de riesgos ambientales y seguridad en las empresas). Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo, Sección de Posgrado en Ingeniería, 2016. 97 pp.

ARIAS, William. Remoción de cromo (III) y DQO a través de electrocoagulación en aguas residuales de las industrias de curtiembre haciendo uso racional de la energía. Tesis (Magister en Ingeniería). Bogotá: Universidad Libre, Faculta de Ingeniería, 2013. 100 pp.

BERMEO, Martha y TINOCO, Oscar. Remoción de colorantes de efluente sintético de industria textil aplicando tecnología avanzada. *Industrial Data*, 19 (2): 91-95, 2016. ISSN: 1560-9146.

BLAXTER, Loraine; HUGHES, Christina y TIGHT, Malcolm. *Cómo se hace una Investigación*. 1a ed. Barcelona: Gedisa, 2000. 370 pp. ISBN: 8474327261

CARHUANCHO, Hans y SALAZAR, Jorge. Estudio del efecto de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales a nivel laboratorio en la planta de tratamiento de aguas residuales Covicorti en la ciudad de Trujillo - La Libertad. Tesis (Licenciado en Ingeniería). Trujillo: Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Química, 2015. 123 pp.

CEGARRA, José. *Metodología de la Investigación Científica y Tecnológica* [en línea]. Madrid: Ediciones Díaz de Santos S.A., 2011 [fecha de consulta: 23 de septiembre de 2017]. Disponible en: <https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=XG4KMFNnP4C&oi=fnd&pg=PR15&dq=metodologia+dela+investigacion+cientifica+y+tecnologica+jose+cegarra+sanchez&ots=evW0B5JzwJ&sig=OvwO18scnx2GjZUqFQMeRbdejE0#v=onepage&q=metodologia%20dela%20investigacion%20cientifica%20y%20tecnologica%20jose%20cegarra%20sanchez&f=false> ISBN: 9788499690278

DICCIONARIO Oxford - Complutense de Ciencias. [En línea]. España: Editorial Complutense, 2000. 1130 pp. [Fecha de consulta: 10 de septiembre de 2017]. Disponible en: https://books.google.com.pe/books?id=_5-yHvJ61eQC&pg=PA276&dq=cromo&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwj8LzW4KzWAhUD5CYKHS_qBiAQ6AEILTAC#v=onepage&q=cromo&f=false ISBN: 8489784809

EL-NASS, Muftah y HAMDAM Shaima. Removal of hexavalent chromium from groundwater by continuous electrocoagulation. Singapur: United Arab Emirates University, Chemical and Petroleum Engineering Department, 2014. 5 pp.

GARCIA, E; LETÓN, P. Guía de Tecnologías de Tratamiento de Aguas para su Reutilización. España: 2012. Tragua Consolider 218 pp. ISBN: 9788469539859

GIL, Julio. Tratamiento electroquímico para la remoción de metales pesados en residuos líquidos peligrosos generados en los laboratorios de docencia de la universidad del Cauca. Tesis (Magister en Ingeniería). Santiago de Cali: Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, 2012. 127 pp.

HERNÁNDEZ, Roberto; FERNANDEZ, Carlos y BAPTISTA, Pilar. Metodología de la Investigación. 5^{ta}. ed. México: McGRAW - HILL, 2010. 656 pp. ISBN: 9786071502919

HUMPIRE, Fredy. Efecto del pH y tiempo en la depuración de lactosuero residual por electrocoagulación. Tesis (Licenciado en Ingeniería). Puno: Universidad Nacional del Antiplano, Facultad de Ciencias Agrarias, 2017. 110 pp.

LLEO, Anastasio y LLEO Lourdes. Gran Manual de su Magnitudes Físicas y sus Unidades [en línea]. Madrid: Ediciones Díaz de Santos S.A., 2008 [fecha de consulta: 20 de octubre de 2017]. Disponible en: https://books.google.com.pe/books?id=0ZgmUIIalCkC&printsec=frontcover&dq=MAGNITUDES+FISICA&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwimwu7Mx__WAhVFNiYKHfefAmsQ6AEIJTAA#v=onepage&q&f=false ISBN: 9788499690254

MAHVI, Amir; NASERI, Simin y MESDAGHINIA, Ali. Performance evaluation of electrocoagulation process for removal of chromium (VI) from syntetic chromium solutions using iron and aluminium electrodes. Zahedan: Zahedan University of Medical Sciences, Department of Enviromental Health, 2006. 8 pp.

MORALES, Nelly y ACOSTA, Gema. Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas. Ciencias e Ingeniería Neogranadina, 20 (1): 33-44, Junio 2010. ISSN: 0124-8170.

PANTOJA, Agérico. Reducción de concentración de hierro en agua, mediante la electrocoagulación. Tesis (Licenciado en Ingeniería). Callao: Universidad Nacional del Callao, Facultad de Ingeniería Química, 2014. 86 pp.

PORTO, Hugo. Evaluación de la remoción de arsénico por electrocoagulación de aguas mineras. Tesis (Licenciado en Ingeniería). Puno: Universidad Nacional del Antiplano, Facultad de Ingeniería Química, 2014. 133 pp.

QUISPE, Karen. Electrocoagulación en la remoción de mercurio de las aguas residuales en el centro poblado La Rinconada - Puno. Tesis (Licenciado en Ingeniería). Puno: Universidad Nacional del Antiplano, Facultad de Ingeniería Química, 2015. 103 pp.

RECICLAJE de Residuos Industriales Residuos Sólidos Urbanos y Fangos de Depuradora por Elías [et al.]. 2da ed. Madrid: Díaz de Santos, S.A., 2009. 1322 pp. ISBN: 9788499693668

RICCIO, Luis. Remoción de aceites y grasas de aguas residuales de la universidad nacional del centro del Perú, por electrocoagulación, a nivel laboratorio. Tesis (Magister en Ingeniería). Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo, Sección de Postgrado en Ingeniería Química, 2010. 66 pp.

RODRIGUEZ, Miguel y MARIN Rafael. Físicoquímica de Aguas. España: Editorial Díaz de Santos, S.A., 1999. [Fecha de consulta: 15 de octubre de 2017]. Disponible en: <https://books.google.com.pe/books?id=0gt-ra9MHHwC&pg=PA23&dq=Es+el+negativo+del+logaritmo+de+la+concentraci%C3%B3n+de+iones+hidronio+que+se+generan+cuando+sucede+la+ionizaci%C3%B3n&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwj6vfijxozXAhVL5CYKHckDAc4Q6AEILDAB#v=onepage&q=Es%20el%20negativo%20del%20logaritmo%20de%20la%20concentraci%C3%B3n%20de%20iones%20hidronio%20que%20se%20generan%20cuando%20sucede%20la%20ionizaci%C3%B3n&f=false> ISBN: 8479783826

SANS, Ramón y DE PABLO, Joan. Ingeniería Ambiental: Contaminación y Tratamientos [en línea]. Colombia: Marcombo, S.A., 1989 [fecha de consulta: 10 de septiembre de 2017]. Disponible en: <https://books.google.com.pe/books?id=kumplOJs6T0C&lpg=PA93&dq=contaminacion%20agua%20metales%20pesados&pg=PP1#v=onepage&q=contaminacion%20agua%20metales%20pesados&f=false> ISBN: 8426707424

UN, Umran; ONPEKER, Eroglu y OZEL, Emel. The treatment of chromium containing wastewater using electrocoagulation and the production of ceramic pigments from the resulting sludge. *Journal of Environmental Management*, 2017, vol. 200, p. 196-203.

VALDERRAMA, José. Información Tecnológica [en línea]. Chile: 1998. Vol 9 N° 6. Chile. Centro de información y Tecnología. Fecha de consulta: 10 de septiembre de 2017]. Disponible en: https://books.google.com.pe/books?id=jqUIENrmQ6YC&pg=PA74&dq=biomasa+tratamiento+metales+pesados+agua&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjnu_eINbWAhVLciYKHXMpBuwQ6AEIJTAA#v=onepage&q=biomasa%20tratamiento%20metales%20pesados%20agua&f=false ISSN: 0716-8756

ANEXOS

ANEXO 01



FICHA DE REGISTRO DE DATOS

CODIGO:

CMM-00_

Título de la investigación : Influencia del pH y el tiempo en la remoción de cromo hexavalente presente en soluciones acuosas utilizando la electrocoagulación

Investigador : Mendocilla Murillos Carlos Eduardo

Muestra de agua : Solución acuosa de 20 ppm de Cr (VI)

Procedencia : Laboratorio de la Universidad Cesar Vallejo

Fecha de preparación de la muestra :

Fecha de análisis de la muestra : **Condiciones** :

Preparación de la muestra

- 1) La preparación de la muestra consistirá en diluir 20 mL de una solución stock preparada de cromo (VI) de 1000ppm en 1L de solución de NaCl a 0.05 M agua destilada, para esto se hará uso de un matraz aforado de 1000 mL. Obteniendo de esta manera una solución de 20 ppm de cromo (VI).
- 2) Por otro lado se necesitara soluciones preparadas de H₂SO₄ y NaOH para ajustar a los 3 diferentes niveles iniciales de pH (3, 5.5 y 8).

Instrucciones

- a. Los resultados serán registrados en cada recuadro correspondiente en ppm.

Tratamiento	Tiempo	pH - _		
		Resultados		
		R1	R2	R3
1	5'			
2	10'			
3	15'			

ANEXO 02

Tabla 7. Materiales, equipos y reactivos

Etapas	Materiales, reactivos y equipos		
	Materiales		
A. Construcción y acondicionamiento de una celda para la electrocoagulación.	<ul style="list-style-type: none"> - 8 Láminas de aluminio de 12x10.5 cm. - 2 placas de acrílico transparente de 12x10 cm. - 2 placas de acrílico transparente de 10x10 cm. - 1 válvula de plástico - 8 cocodrilos pequeños - Cable de uso eléctrico. - Fuente de energía continua - Multímetro. 		
	Materiales	Equipos	Reactivos
B. Preparación de solución madre de Cr (VI).	<ul style="list-style-type: none"> - 1 fiola de 500 mL. - 1 espátula. - 1 recipiente color ámbar de 500 mL. - 1 crisol - 1 embudo. - Pinza y guantes 	<ul style="list-style-type: none"> - 1 Horno. - 1 Balanza analítica. - 1 desecador. 	<ul style="list-style-type: none"> - 1 L de agua destilada. - 1.414g de sal de dicromato de potasio.
C. Construcción de la curva de calibración del cromo VI	<ul style="list-style-type: none"> - 7 balones aforados de 50 mL. - 1 condensador. - 1 pipeta de 10 mL. 	<ul style="list-style-type: none"> - Espectrofotómetro de abs atómica. - Calculadora - Laptop 	<ul style="list-style-type: none"> - Solución de cromo VI a 1000 ppm. - 1 L de agua destilada
D. Preparación de la muestra.	<ul style="list-style-type: none"> - 1 fiola de 1000 mL. - 1 pipeta aforada de 10 mL. - 1 condensador. - 1 contenedor de 3L. 	<ul style="list-style-type: none"> - pH metro - Conductímetro 	<ul style="list-style-type: none"> - 180 mL de solución de cromo VI a 1000 ppm - 9 L de agua destilada - 26.325 g de NaCl. - solución de H₂SO₄ 0.2 N. - Solución de NaOH 0.2 N.
E. Tratamiento de la muestra	<ul style="list-style-type: none"> - Vaso de precipitado de 1000 mL - Cronometro. 	<ul style="list-style-type: none"> - Celda de electrocoagulación. 	<ul style="list-style-type: none"> - 900 mL de solución de cromo VI a 20 ppm.
F. Recolección de la muestra y análisis	<ul style="list-style-type: none"> - 27 tubos de ensayo con tapón - 6 vasos de precipitación de 100mL. 	<ul style="list-style-type: none"> - Espectrofotómetro o Abs Atómica. 	<ul style="list-style-type: none"> - 1 L de agua destilada. - Solución tratada de Cr (VI).

	- 27 papeles filtro. - 3 balones aforados de 50 mL. - Rotulador. - Pipetas de 10 mL - Condensador. - Fiola de 50 mL	
G. tratamiento de datos	- Calculadora. - Ficha de recolección de datos.	- Laptop. - Programas. - SPSS - Excel

Fuente: Elaboración propia, 2018

ANEXO 03

Procedimiento experimental

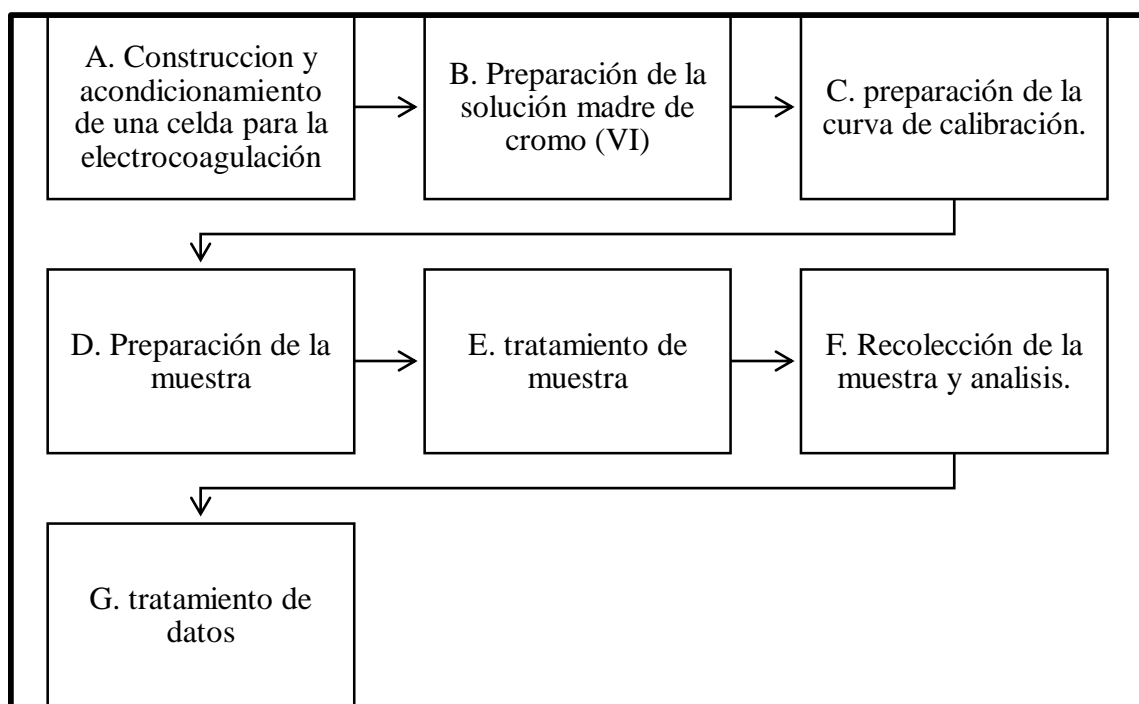


Figura 4. Diagrama de bloques del procedimiento experimental

A. Construcción y acondicionamiento de una celda para la electrocoagulación.

El reactor de electrocoagulación fue de forma rectangular y de material acrílico transparente, el cual tuvo un sistema de toma de muestra por medio de una válvula de plástico, ubicado a una altura de 4.5 cm respecto a la base y a 5 cm de distancia respecto a los laterales. Las medidas del reactor serán las siguientes:

- Ancho 10 cm
- Largo 12 cm
- Altura 10 cm

Los 8 electrodos de aluminio (4 ánodos y 4 cátodos) que se introdujo en el reactor tuvieron forma de T, cuyas medidas se representa en la figura 02.

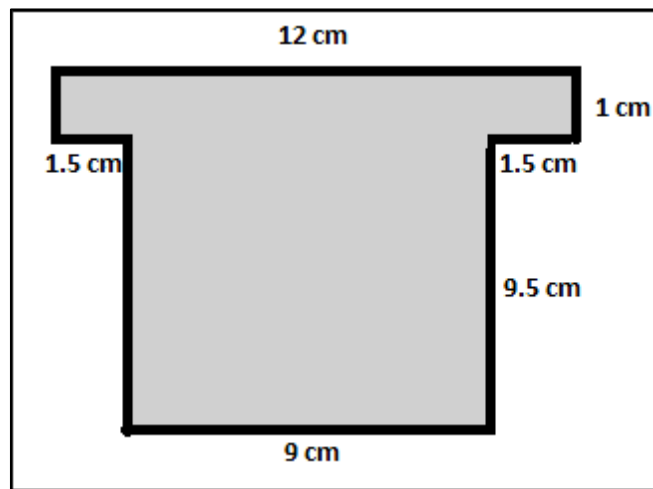


Figura 5. Diseño y medidas del electrodo

La forma de T que se le dio sirvió para que con sus extremos se puedan sostener mediante unos sujetadores de acrílico, la cual estuvo apoyado a lo largo del filo de las paredes laterales del reactor.

Cada electrodo tuvo una superficie de contacto de 75.6 cm² (9x8.4) cada uno. Estos estuvieron configurados alternadamente y en forma paralela, así mismo fueron

conectados por medio de cocodrilos y cable de uso eléctrico a una fuente de energía continua de 4 amperios y 5 voltios.

B. Preparación de la solución madre de cromo (VI)

Realizando los cálculos para la preparación de una solución de 1000 ppm de cromo hexavalente, se aplica la siguiente fórmula:

$$\text{ppm (Cr)} = \frac{\text{peso del soluto (mg)} \frac{\text{peso molecular de Cr}}{\text{peso molecular de K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}}{\text{Volumen en L}}$$
$$1000\text{ppm (Cr)} = \frac{\text{peso del soluto (mg)} \frac{103.992}{294.185}}{0.5 \text{ L}}$$
$$\text{peso del soluto (g)} = 1.414 \text{ g de K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$$

Entonces en una balanza analítica con la ayuda de una espátula se pesó 1.414 g de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, luego fue llevado en una capsula crisol hacia el horno, en el cual se tuvo por una hora a una temperatura de 100 °C con la finalidad de eliminar la humedad que el soluto pudiera tener.

Posteriormente fue enfriado en un desecador, para luego ser disuelto en un balón aforado de 500 mL con agua destilada. Finalmente la solución preparada fue almacenada en un recipiente color ámbar de 500 mL, ya que puede reaccionar con la luz y cambiar sus propiedades.

C. Preparación de la curva de calibración.

La curva de calibración sirve para determinar la cantidad de cromo disuelto que puede existir en una solución acuosa, para ello se tuvo que realizar lo siguiente:

- Se preparó una solución patrón de 100 mL de cromo (VI) de 5 ppm, para esto se extrajo 0.5 mL de la solución madre de cromo (VI) de 1000 ppm, luego vaciarlo en un balón aforado de 100 mL y aforarlo con agua destilada.

- Luego se realizó 4 soluciones en balones aforados de 50 mL enumerados del 1 al 4 en los cuales se agregaron 0, 5, 10 y 20 mL respectivamente de la solución patrón de cromo (VI), en el balón N° 1 no se adicionó solución patrón debido a que se le considero como blanco.
- Posteriormente se realizó las lecturas de absorbancia en un espectrofotómetro de absorción atómica a la llama.

Tabla 8. *Tabla de datos de curva de calibración*

N°	ppm Cr+6	abs
1	0	0.0005
2	0.5	0.017
3	1	0.033
4	2	0.062

Fuente: Elaboración propia, 2018

- Finalmente se con los datos obtenidos de la lectura se elaboró la curva de calibración.

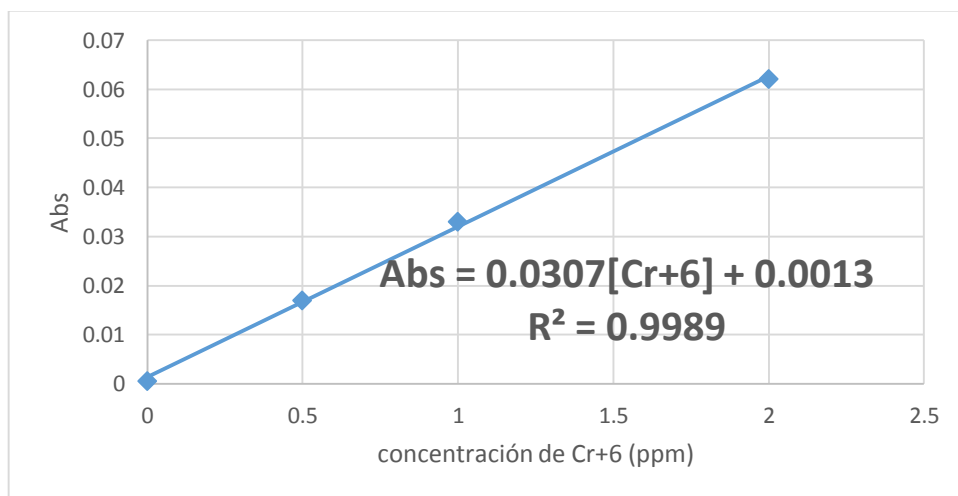


Figura 6. Recta de calibración para la determinación de cromo total

D. Preparación de la muestra

Se trabajó con muestras de 900 mL de cromo (VI) a 20 ppm, la cual también estuvo compuesta por una concentración de NaCl a 0.05 M, el pH inicial fue variado tres veces (3, 5.5 y 8), para lo cual se tuvo que realizar lo siguiente:

- Se diluyo 180 ml de la solución madre de cromo en 9000 ml, luego se le agregó 26.325 g de NaCl, de esta manera se obtuvo una concentración molar de 0.05 M de NaCl y una concentración de 20 ppm de cromo (VI)
- Posteriormente se aforo en una fiola de 1000 mL la solución preparada y luego se vertió el contenido a un vaso volumétrico de 1000 mL, luego se reguló el pH agregando gota a gota soluciones de NaOH/H₂SO₄ 0.02 N, utilizando pH – metro para la regulación correcta y un agitador magnético para la homogenización de la mezcla.
- Finalmente, una vez ajustado el pH se almaceno el contenido en recipientes de tres litros para cada pH de color oscuro hasta su tratamiento.

Este procedimiento se tuvo que realizar nueve veces, debido a que se regulo el pH litro por litro.

E. Tratamiento de la muestra

Siguiendo con el procedimiento, el tratamiento de la muestra consistió en lo siguiente:

- De la muestra a pH 3 preparada se midió 900 mL y se introdujo al reactor de electrocoagulación, la fuente de alimentación se mantuvo constante a 5 voltios y 4 amperios.
- Se controló el tiempo de electrocoagulación, cada 5 minutos, por un tiempo de 15 minutos.
- Finalmente este procedimiento se repitió tres veces, para cada solución preparada de cromo a distinto pH.

F. Recolección de la muestra y análisis

Para esta etapa se realizaron los siguientes pasos:

- Se tomó una alícuota de 10 mL a 5, 10 y 15 minutos, para luego ser filtradas y almacenadas debidamente rotuladas.
- Para realizar la lectura de la absorbancia en el espectrofotómetro de absorción atómica se tuvo que realizar diluciones de 1 en 10.
- Cada lectura de absorbancia se procedió a remplazar en la ecuación de la recta y se determinó la concentración diluida.
- Posteriormente la concentración diluida se multiplico por el factor de dilución (FD=10).
- Finalmente se anotó los resultados obtenido en la ficha registro de datos (ver anexo N° 01).

G. Análisis de los resultados

Los datos que se obtuvieron fueron procesados estadísticamente por el programa de computación Excel, para los gráficos estadísticos; SPSS para la obtención de ANOVA y pruebas post hoc.

ANEXO 04

Tabla 9. *Lectura de absorbancias de cromo total*

Tratamiento	Tiempo (min)	absorbancias		
		R1	R2	R3
pH 3				
1	5	0.0200	0.0197	0.0181
2	10	0.0058	0.0085	0.0071
3	15	0.0030	0.0019	0.0038
pH 5.5				
4	5	0.0245	0.0259	0.0275
5	10	0.0096	0.0131	0.0117
6	15	0.0050	0.0084	0.0045
pH 8				
7	5	0.0335	0.0347	0.0320
8	10	0.0139	0.0184	0.0162
9	15	0.0091	0.0099	0.0075

Fuente: Elaboración propia, 2018

R1: primera réplica

R2: segunda réplica

R3: tercera réplica

ANEXO 05

Tabla 10. *Parámetros iniciales al tratamiento*

Conductividad (mS/cm)	Densidad eléctrica (mA/cm ²)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Concentración de NaCl [molar]	Cromo (Cr ⁺⁶ ppm)	Volumen (mL)
pH 3						
3.5	6.614	4	5	0.05	20.5917	900
pH 5.5						
4.7	6.614	4	5	0.05	20.5917	900
pH 8						
4.8	6.614	4	5	0.05	20.5917	900

Fuente: Elaboración propia, 2018

ANEXO 06

Tabla 11. Resultados de concentraciones de cromo (VI)

Tratamiento	Tiempo (min)	Cr+6 (ppm)					
		concentración diluida en 10			Concentración real		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3
pH 3							
1	5	0.6104	0.5999	0.5456	6.1040	5.9989	5.4561
2	10	0.1481	0.2359	0.1875	1.4806	2.3585	1.8750
3	15	0.0566	0.0191	0.0823	0.5661	0.1907	0.8227
pH 5.5							
4	5	0.7564	0.8017	0.8545	7.5643	8.0171	8.5454
5	10	0.2701	0.3849	0.3380	2.7012	3.8491	3.3798
6	15	0.1201	0.2306	0.1058	1.201	2.3057	1.0580
pH 8							
7	5	1.0475	1.0880	0.9996	10.4745	10.8803	9.9957
8	10	0.4091	0.5573	0.4838	4.0905	5.5727	4.8377
9	15	0.2534	0.2812	0.2025	2.5343	2.8117	2.0247

Fuente: Elaboración propia, 2018

Para obtener las lecturas en ppm se utilizó la ecuación de la curva de calibración (figura 6 en anexo 3).

ANEXO 07

Tabla 12. Valores de remoción de cromo (VI)

Tratamiento	Tiempo (min)	Remoción (ppm)		
		R1	R2	R3
pH 3				
1	5	14.4877	14.5928	15.1356
2	10	19.1111	18.2332	18.7167
3	15	20.0256	20.4010	19.7690
pH 5.5				
6	5	13.0274	12.5746	12.0463
7	10	17.8905	16.7426	17.2119
8	15	19.3907	18.2860	19.5337
pH 8				
11	5	10.1172	9.7114	10.5960
12	10	16.5012	15.0190	15.7540
13	15	18.0574	17.7800	18.5670

Fuente: Elaboración propia, 2018

Para la obtención de los datos de remoción (tabla 12), se realizó una resta a la concentración inicial 20.5917 con cada valor de la concentración real.

ANEXO 08

Tabla 13. Normalidad para el factor pH

pH	Kolmogorov-Smirnov ^a		
	Estadístico	gl	Sig.
pH 3	.233	9	.173
cromo pH 5.5	.226	9	,200*
pH 8	.206	9	,200*

***. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.**

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: Elaboración propia, 2018

H₀: los datos de remoción de cromo según la variable independiente pH presentan una distribución normal.

H₁: los datos de remoción de cromo según la variable independiente pH no presentan una distribución normal.

Se acepta la hipótesis nula.

ANEXO 09

Tabla 14. Normalidad para el factor tiempo

Tiempo		Kolmogorov-Smirnov ^a		
		Estadístico	gl	Sig.
cromo	min 5	.173	9	,200*
	min10	.126	9	,200*
	min 15	.181	9	,200*

***. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.**

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: Elaboración propia, 2018

H₀: los datos de remoción de cromo según la variable independiente tiempo presentan una distribución normal.

H₁: los datos de remoción de cromo según la variable independiente tiempo no presentan una distribución normal.

Se acepta la hipótesis nula

ANEXO 10

Tabla 15. *Homogeneidad de varianzas*

Prueba de igualdad de Levene de varianzas de error^a			
Variable dependiente:	cromo		
F	df1	df2	Sig.
.494	8	18	.845
Prueba la hipótesis nula que la varianza de error de la variable dependiente es igual entre grupos.			
a. Diseño : Interceptación + pH + Tiempo + pH * Tiempo			

Fuente: Elaboración propia, 2018

H₀: los datos de remoción de cromo según las variables independientes pH y tiempo presentan varianzas homogéneas.

H₁: los datos de remoción de cromo según las variables independientes pH y tiempo no presentan varianzas homogéneas.

Se acepta la hipótesis nula

ANEXO 11

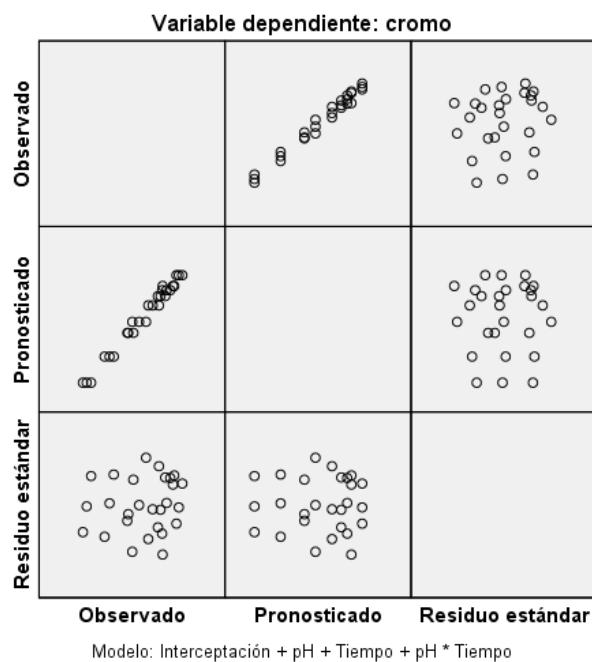


Figura 7. Independencia y linealidad de las muestras

- Para la **independencia**: se aprecia que en los cuadrantes de Residuo versus Observados, que existe aleatoriedad independiente dentro de cada uno de los grupos, debido a que se observa que este no forma ni curvas, ni líneas y se encuentra disperso.
- Para la **linealidad**: se aprecia que en los cuadrantes de Pronosticado versus Observado, que existe bondad en los ajustes de los datos, debido a que este muestra un perfil cercano a la linealidad, es decir que en dicho cuadrante se observa que los datos se aproximan a formar un línea recta.
- Para la **homogeneidad de varianzas**: se aprecia que en los cuadrantes Residuo versus Pronosticados muestra dispersión similar a la aleatoriedad, comprobando con la prueba de Levene realizado, que efectivamente las varianzas son homocedásticas.

ANEXO 12

Tabla 16. Pruebas post hoc para la variable pH

cromo				
pH	N	Subconjunto		
		1	2	3
HSD Tukey^{a,b}	pH 8	9	14.678133	
	pH 5.5	9		16.300411
	pH 3	9		17.830306
	Sig.		1.000	1.000
Duncan^{a,b}	pH 8	9	14.678133	
	pH 5.5	9		16.300411
	pH 3	9		17.830306
	Sig.		1.000	1.000
Scheffe^{a,b}	pH 8	9	14.678133	
	pH 5.5	9		16.300411
	pH 3	9		17.830306
	Sig.		1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = ,262.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 9,000.

b. Alfa = .05.

Fuente: Elaboración propia, 2018

ANEXO 13

Tabla 17. Prueba post hoc para la variable tiempo

cromo				
Tiempo	N	Subconjunto		
		1	2	3
HSD Tukey^{a,b}	5 min	9	12.476556	
	10 min	9		17.242250
	15 min	9		19.090044
	Sig.		1.000	1.000
Duncan^{a,b}	5 min	9	12.476556	
	10 min	9		17.242250
	15 min	9		19.090044
	Sig.		1.000	1.000
Scheffe^{a,b}	5 min	9	12.476556	
	10 min	9		17.242250
	15 min	9		19.090044
	Sig.		1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = ,262.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 9,000.

b. Alfa = .05.

Fuente: Elaboración propia, 2018

ANEXO 14

Tabla 18. Comparaciones múltiples para la variable pH

Variable dependiente:		cromo					
(I) pH		Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%		
					Límite inferior	Límite superior	
HSD Tukey	pH 3	pH 5.5	1,529894*	.2414143	.000	.913766	2.146023
		pH 8	3,152172*	.2414143	.000	2.536043	3.768301
	pH 5.5	pH 3	-1,529894*	.2414143	.000	-2.146023	-.913766
		pH 8	1,622278*	.2414143	.000	1.006149	2.238407
	pH 8	pH 3	-3,152172*	.2414143	.000	-3.768301	-2.536043
		pH 5.5	-1,622278*	.2414143	.000	-2.238407	-1.006149
Scheffe	pH 3	pH 5.5	1,529894*	.2414143	.000	.886213	2.173576
		pH 8	3,152172*	.2414143	.000	2.508491	3.795853
	pH 5.5	pH 3	-1,529894*	.2414143	.000	-2.173576	-.886213
		pH 8	1,622278*	.2414143	.000	.978597	2.265959
	pH 8	pH 3	-3,152172*	.2414143	.000	-3.795853	-2.508491
		pH 5.5	-1,622278*	.2414143	.000	-2.265959	-.978597

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = ,262.

***. La diferencia de medias es significativa en el nivel .05.**

Fuente: Elaboración propia, 2018

Las comparaciones múltiples de pH realizadas, muestra que existe diferencia entre sus subgrupos, ya que el “p” valor es menor al alfa (0.05)

ANEXO 15

Tabla 19. Comparaciones múltiples para la variable tiempo

Variable dependiente:		cromo					
(I) Tiempo		Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%		
					Límite inferior	Límite superior	
HSD Tukey	5 min	10 min	-4,765694*	.2414143	.000	-5.381823	-4.149566
		15 min	-6,613489*	.2414143	.000	-7.229618	-5.997360
	10 min	5 min	4,765694*	.2414143	.000	4.149566	5.381823
		15 min	-1,847794*	.2414143	.000	-2.463923	-1.231666
	15 min	5 min	6,613489*	.2414143	.000	5.997360	7.229618
		10 min	1,847794*	.2414143	.000	1.231666	2.463923
Scheffe	5 min	10 min	-4,765694*	.2414143	.000	-5.409376	-4.122013
		15 min	-6,613489*	.2414143	.000	-7.257170	-5.969808
	10 min	5 min	4,765694*	.2414143	.000	4.122013	5.409376
		15 min	-1,847794*	.2414143	.000	-2.491476	-1.204113
	15 min	5 min	6,613489*	.2414143	.000	5.969808	7.257170
		10 min	1,847794*	.2414143	.000	1.204113	2.491476

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = ,262.

***. La diferencia de medias es significativa en el nivel .05.**

Fuente: Elaboración propia, 2018

Las comparaciones múltiples de tiempo realizadas, muestra que existe diferencias entre sus subgrupos, ya que el “p” valor es menor al alfa (0.05)

ANEXO 16

Cinemática de remoción de cromo (VI)

Para hallar la cinemática de la remoción primero se realizó un cálculo del logaritmo natural de cada concentración de cromo, el cual nos brindó un R^2 mejor ajustada en comparación con los modelos matemáticos de otras reacciones de orden diferente. Para esto se siguió el siguiente procedimiento:

- i. Se grafica el logaritmo natural de la concentración del cromo en función del tiempo.
- ii. Se obtiene la ecuación de la recta lineal que forma.
- iii. Los valores de la pendiente tienen forma de $y = a + bx$, con el cual nos damos cuenta que pertenece a una ecuación lineal.
- iv. Los valores se reemplazan por la ecuación de reacción de primer orden, dada por:

$$\ln[A]_t = \ln[A]_0 - K(t) \dots \dots (1)$$

- v. Ya ubicando cada valor se puede realizar el cálculo del tiempo de vida media de la concentración de cromo, reemplazando K en la siguiente ecuación:

$$t_{1/2} = 0.693/K \dots \dots (2)$$

Tabla 20. Datos ajustados para la cinética de remoción de cromo (VI) a pH 3

Tiempo (min)	Cromo (ppm Cr ⁺⁶)	Ln [ppm Cr ⁺⁶]
pH 3		
0	20.59170	3.02
5	5.85300	1.77
10	1.90470	0.64
15	0.52650	-0.64

Fuente: Elaboración propia, 2018

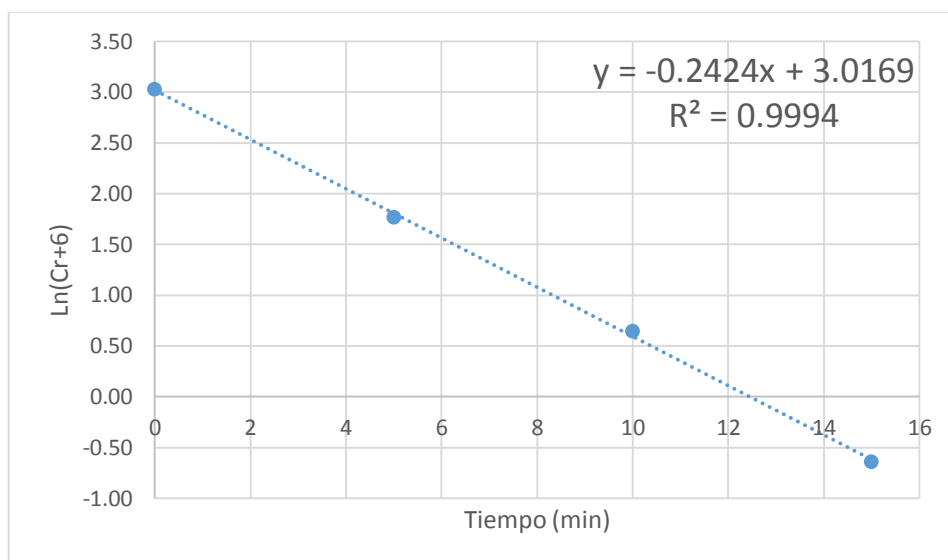


Figura 8. Cinética de remoción de cromo (VI) a pH 3

De la figura 8 se sabe que la constante de velocidad es 0.2424, con la cual se pudo calcular el tiempo de vida media ($t_{1/2} = 2.8589$ minutos).

De modo que el cromo (VI) a pH 3 tardaría aproximadamente 3 minutos en disminuir la concentración inicial a la mitad.

Tabla 21. Datos ajustados para la cinética de remoción de cromo (VI) a pH 5.5

Tiempo (min)	Cromo (ppm Cr ⁺⁶)	Ln [ppm Cr ⁺⁶]
pH 5.5		
0	20.59170	3.02
5	8.04227	2.08
10	3.31003	1.20
15	1.52157	0.42

Fuente: Elaboración propia, 2018

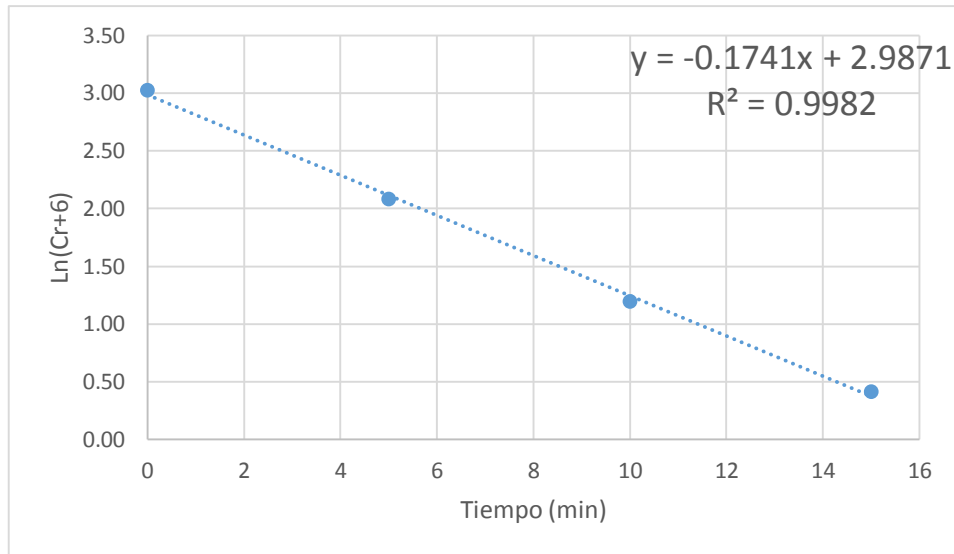


Figura 9. Cinética de remoción a pH 5.5

De la figura 9 se sabe que la constante de velocidad es 0.1741, con la cual se pudo calcular el tiempo de vida media ($t_{1/2} = 3.9805$ minutos).

De modo que el cromo (VI) a pH 5 tardaría aproximadamente 4 minutos en disminuir la concentración inicial a la mitad.

Tabla 22. Datos ajustados para la cinética de remoción de cromo (VI) a pH 8

Tiempo (min)	Cromo (ppm Cr ⁺⁶)	Ln [ppm Cr ⁺⁶]
pH 8		
0	20.59170	3.02
5	10.45017	2.35
10	4.83363	1.58
15	2.45690	0.90

Fuente: Elaboración propia, 2018

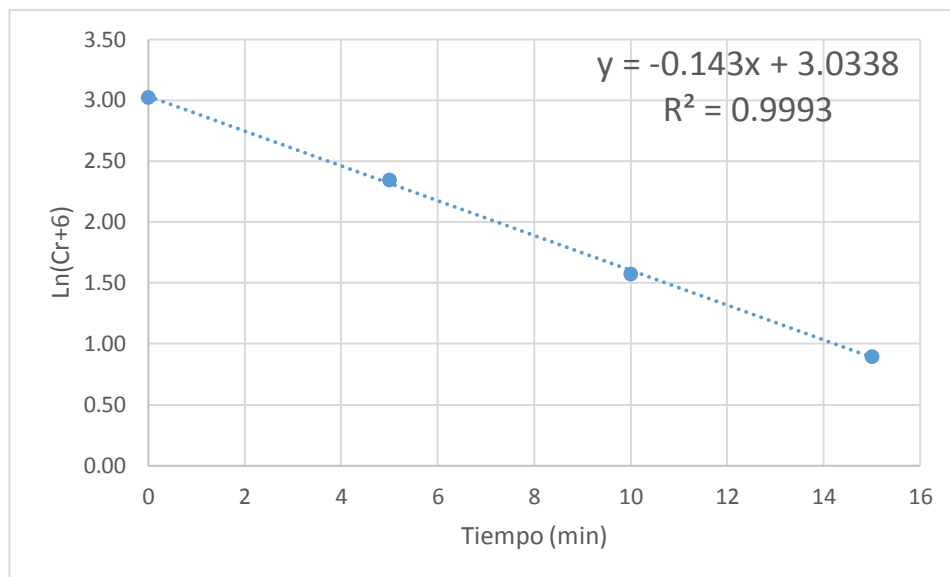


Figura 10. Cinética de remoción de cromo (VI) a pH 8

De la figura 10 se sabe que la constante de velocidad es 0.143, con la cual se pudo calcular el tiempo de vida media ($t_{1/2} = 4.8462$ minutos).

De modo que el cromo (VI) a pH 8 tardaría aproximadamente 5 minutos en disminuir la concentración inicial a la mitad.

ANEXO 17

Tabla 23. Remoción de cromo por área de electrodo

pH	tiempo	mgr
pH 3	0	0.0306
	5	0.0087
	10	0.0028
	15	0.0008
pH 5.5	0	0.0306
	5	0.0120
	10	0.0049
	15	0.0023
pH 8	0	0.0306
	5	0.0156
	10	0.0072
	15	0.0037

Fuente: Elaboración propia, 2018

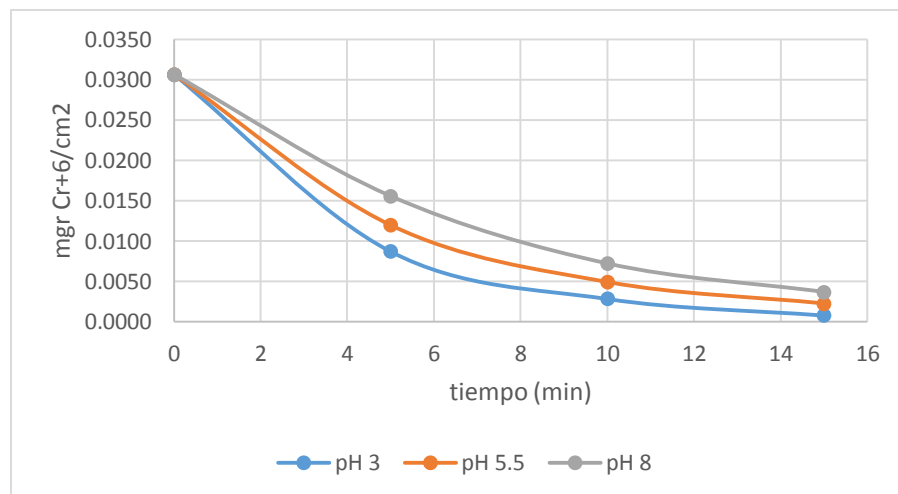


Figura 11. Remoción de cromo por área de electrodo en función del tiempo

En la presente grafica de la figura 11, se muestra los gramos de cromo eliminados en el proceso de electrocoagulación por cada centímetro de electrodo con respecto al tiempo.

ANEXO 18

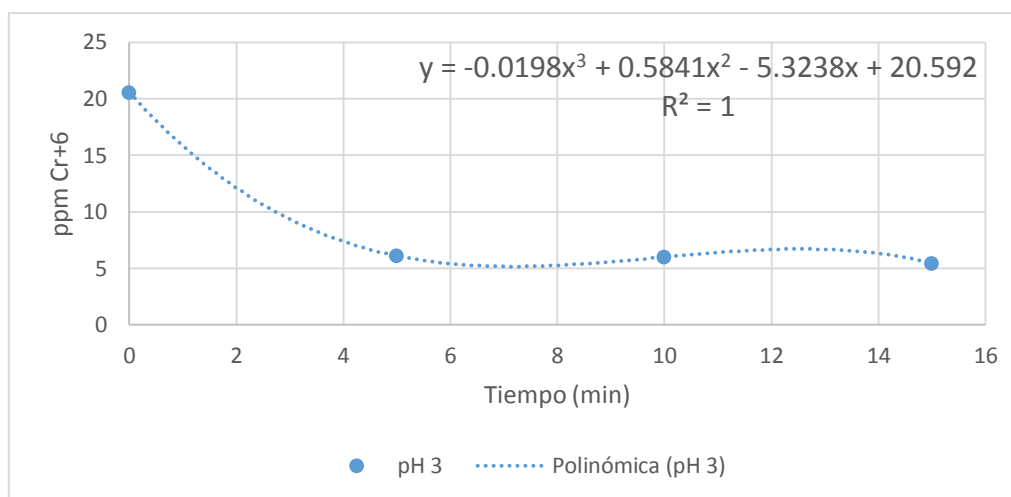


Figura 12. Polinómica para la remoción de cromo (VI) en función del tiempo a pH 3

En el gráfico de la figura 12 muestra una curva polinómica de orden tres para los datos obtenidos en los tratamientos realizados a pH 3. De forma que se pueda se pueda predecir la concentración del cromo (VI) en función del tiempo.

ANEXO 19

Registro fotográfico



Figura 13. Electrodo de aluminio



Figura 14. Enfriamiento de la sal de dicromato de potasio



Figura 15. Medición de la masa del cloruro de sodio



Figura 16. Regulación del pH

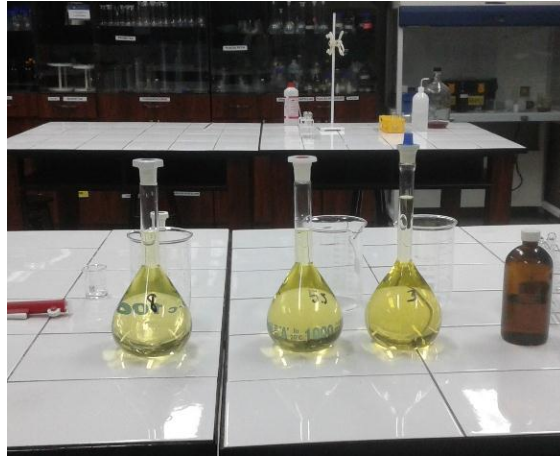


Figura 17. Muestras preparadas a diferentes pH



Figura 18. Medición de la conductividad eléctrica de las muestras preparadas

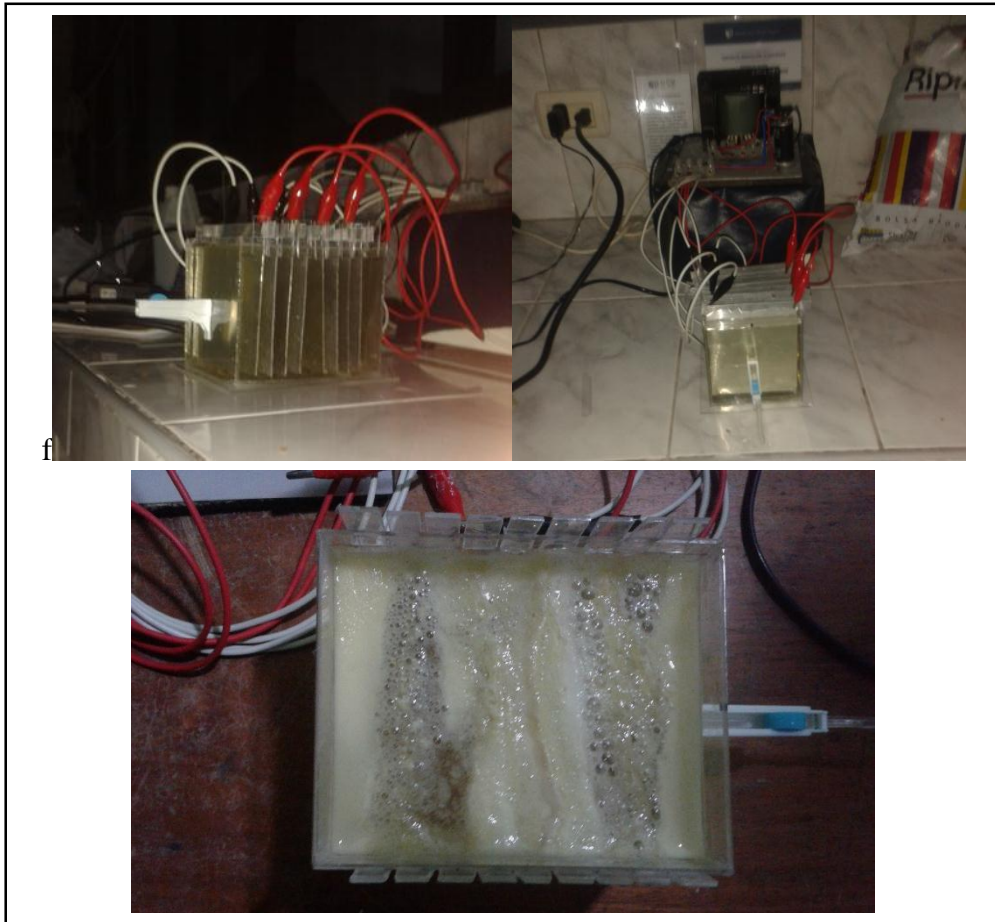


Figura 19. Proceso de electrocoagulación del cromo (VI).



Figura 20. Muestras pre y post al tratamiento

ANEXO 20

Consumo energético

Mediante la siguiente operación se determinó la cantidad de energía utilizada por 900 mL de solución tratada de cromo (VI) a 20.5927 ppm.

Donde:

$$\text{Consumo energético} = (A * V * T)$$

$$\text{Consumo energético} = (\text{kWh})$$

A = Intensidad de corriente (amperios)

V = diferencia de potencial eléctrico (voltios)

T = tiempo (horas)

$$\text{Consumo energético} = (4A)(5v)(15\text{min})(1\text{h}/60\text{min})$$

$$\text{Consumo energético} = 5.\text{Wh} = 0.005 \text{ kWh}$$

El consumo energético por cada litro tratado fue aproximadamente 0.005 kWh, calculo que estuvo sujeto bajo el tiempo óptimo encontrado (15 min).