

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**

**FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA**

**UNIDAD DE INVESTIGACION DE LA FACULTAD DE  
INGENIERIA QUIMICA**



**INFORME FINAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACION**

**“REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACION DE CROMO HEXAVALENTE EN  
AGUA MEDIANTE EL USO DE CHATARRA DE ALUMINIO CERO-VALENTE”**

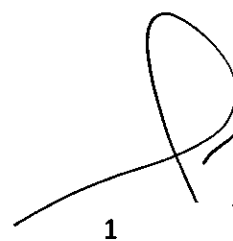
**CESAR GUTIERREZ CUBA**

Callao, 2019

Perú

**“REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACION DE CROMO HEXAVALENTE EN  
AGUA MEDIANTE EL USO DE CHATARRA DE ALUMINIO CERO-VALENTE”**

**CESAR GUTIERREZ CUBA**

A handwritten signature in black ink, consisting of a large loop and a long horizontal stroke extending to the left.

### **Dedicatoria**

Este trabajo es  
dedicado a mi  
familia por su apoyo  
constante en el  
logro de mis metas.

## INDICE

	Pág
Índice de Tablas	6
Índice de Figuras	7
Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
I. Planteamiento del Problema	
1.1. Descripción de la realidad problemática	13
1.2. Formulación del Problema	13
1.2.1. General	14
1.2.2. Específicos	14
1.3. Objetivos	14
1.3.1. General	14
1.3.2. Específicos	14
1.4. Limitantes de la Investigación	15
II. Marco teórico	
2.1. Antecedentes	16
2.2. Bases Teóricas	17
2.2.1. Metales pesados en agua	17
2.2.2. Cromo en el agua	21
2.2.3. Reacciones de Oxidación-Reducción	22
2.2.4. Procesos de tratamiento empleando aluminocero-valente	23
2.2.5. Metodología de superficie de respuesta	25
2.3. Conceptual	34
2.4. Definición de términos básicos	35

III. Hipótesis y variables	
3.1. Hipótesis	37
3.1.1. General	37
3.1.2. Específicas	37
3.2. Definición conceptual de variables	37
3.2.1. Operacionalización de variables	38
IV. Diseño Metodológico	
4.1. Tipo y Diseño de Investigación	39
4.2. Método de Investigación	39
4.3. Población y Muestra	43
4.4. Lugar de estudio y Periodo Desarrollado	44
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la Información	44
4.6. Análisis y Procesamiento de datos	44
V. Resultados	
5.1. Resultados Descriptivos	45
5.2. Resultados Inferenciales	61
VI. Discusión de resultados	
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	68
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares	71
6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos Vigentes	71
VII. Conclusiones	72
VIII. Recomendaciones	73
IX. Referencias Bibliográficas	74
Anexos	77

## INDICE DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Estándares del nivel máximo permisible, para metales pesados, establecidos por Usepa	20
Tabla 2. Operacionalizacion de variables	39
Tabla 3. Variables y niveles considerados prueba chatarra de aluminio latas de gaseosa	40
Tabla 4. Diseño experimental prueba chatarra de aluminio latas de gaseosa	41
Tabla 5. Variables y niveles considerados refrigerante placa base de PC	42
Tabla 6. Diseño experimental prueba chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC	43
Tabla 7. Soluciones de calibración	46
Tabla 8. Resultados de lecturas de absorbancia en espectrofotómetro	48
Tabla 9. Resultados diseño experimental prueba chatarra de aluminio latas de gaseosa	57
Tabla 10. Resultados diseño experimental prueba chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC	61
Tabla 11. Resumen del ajuste datos chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC	62
Tabla 12. Análisis de varianza datos chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC	62
Tabla 13. Falta de ajuste datos chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC	62
Tabla 14. Estimación de parámetros datos chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC	63

## INDICE DE FIGURAS

	<b>Pág</b>
Figura 1. Regiones de operabilidad (cubo mayor) y experimental	26
Figura 2. Esquema de los elementos de la metodología de superficie de respuesta en su contexto amplio	29
Figura 3. Superficies de respuesta: a) descrita por un modelo de primer orden; b), c) y d) descritas por modelos de segundo orden	31
Figura 4. Datos curva de calibración y ajuste de regresión lineal en Excel	49
Figura 5. Pantalla curva de calibración en el espectrofotómetro varian del laboratorio de investigación	50
Figura 6. Latas de aluminio desechadas siendo cortadas	51
Figura 7. Muestras de chatarra de aluminio para su pretratamiento con soluciones de HCl	52
Figura 8. Pre-tratamiento de chatarra de aluminio con ácido clorhídrico a tres concentraciones (0,5 N, 1 N y 1,5 N)	53
Figura 9. Solución de Cromato de Potasio ( $K_2CrO_4$ ) a 22,5 mg $Cr^{6+}/L$	54
Figura 10. Reactores donde se realizaron las pruebas de tratamiento de agua con Cromo (VI)	55
Figura 11. Sistema reactivo mostrando al aluminio en suspensión por Agitación	56
Figura 12. Placa base mostrando el refrigerante hecho de aluminio	58
Figura 13. Refrigerante cortado en tres partes	58

Figura 14. Reactores donde se realizaron las pruebas de tratamiento de agua con Cromo (VI) con chatarra de refrigerante	59
Figura 15. Reactor en operación con aluminio de refrigerante de PC en contacto con la solución de cromo y agitación magnética	60
Figura 16. Resumen de efectos datos chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC	63
Figura 17. Gráfico de residuos frente a valores predichos para datos chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC	64
Figura 18. Gráfico de residuos frente a las filas para datos chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC	64
Figura 19. Expresión de predicción para datos chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC	65
Figura 20. Captura de los valores experimentales y el predicho por el modelo dado en la figura 19 para las 18 pruebas experimentales de datos de chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC	66
Figura 21. Captura del Gráfico de Optimización del perfilador de predicción para datos chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC, mostrando los valores óptimos para mayor reducción de Cr(VI)	67



## RESUMEN

El cromo hexavalente es conocido por ser tóxico para humanos, animales, plantas y microorganismos. El Cr (VI) también se acumula a lo largo de la cadena alimentaria y puede afectar a los seres humanos. Por lo tanto, la contaminación por Cr (VI) del agua natural se considera una preocupación ambiental importante. El procedimiento tradicional utilizado actualmente para eliminar Cr (VI) es su reducción química a Cr (III) seguida de precipitación.

En la presente investigación se estudió la reducción de la concentración de cromo hexavalente en agua mediante el uso de chatarra de aluminio

De pruebas realizadas, se pudo comprobar que empleando como chatarra de Aluminio el refrigerante de la placa base de PCs da mejor resultados para la reacción de oxidación- reducción. Se ha conseguido reducciones del 59,3 %. Se puede concluir que el método no es muy eficiente y podría ser usado como una etapa preliminar de tratamiento, antes de usar otro método adicional que permita una remoción mayor de Cromo

Variables que tienen los efectos más importantes en el tratamiento son el pH, el término cuadrático de la temperatura, la interacción de temperatura-tiempo de reacción, el tiempo de reacción y la interacción temperatura-pH en ese orden de importancia. Empleando métodos de optimización, los valores óptimos para conseguir la mayor reducción de Cr(VI) se da bajo las siguientes condiciones:

Temperatura = 20 °C; pH = 2; Tiempo de tratamiento = 120 min.

Palabras Clave: Aluminio cero Valente, reducción, Cr(VI), Optimización.

## ABSTRACT

Hexavalent chromium is known to be toxic to humans, animals, plants and microorganisms. Cr (VI) also accumulates along the food chain and can affect humans. Therefore, contamination by Cr (VI) of natural water is considered an important environmental concern. The traditional procedure currently used to eliminate Cr (VI) is its chemical reduction to Cr (III) followed by precipitation. In the present investigation, the reduction of the concentration of hexavalent chromium in water by the use of aluminum scrap was studied.

From tests carried out, it was found that using aluminum scrap as the PC base plate coolant gives better results for the oxidation-reduction reaction. Reductions of 59.3% have been achieved. It can be concluded that the method is not very efficient and could be used as a preliminary stage of treatment, before using another additional method that allows a greater removal of Chromium.

Variables that have the most important effects in the treatment are pH, the quadratic term of the temperature, the interaction of temperature-reaction time, the reaction time and the temperature-pH interaction in that order of importance.

Using optimization methods, the optimal values to achieve the greatest reduction of Cr (VI) is given under the following conditions:

Temperature = 20 °C; pH = 2; Treatment time = 120 min.

Keywords: Aluminum zero Valente, reduction, Cr (VI), Optimization.

## INTRODUCCION

La presencia de metales pesados en agua se ha convertido en un grave problema ambiental en las últimas décadas.

Los contaminantes ambientales de los metales (Gheju M. y Pode R., 2010) son particularmente problemáticos porque, a diferencia de la mayoría de los contaminantes orgánicos, no sufren degradación. Sin embargo, los metales reactivos a menudo tienen diferentes grados de toxicidad, dependiendo del estado de oxidación del metal específico.

El cromo metal (Cr) se produce (Onchoque K y Sasu S., 2016) de forma natural en el medio ambiente y tiene riesgos humanos tanto beneficiosos como potenciales. Cr existe en muchos estados de oxidación con Cr (III) y Cr (VI) siendo los principales estados de oxidación existentes en el medio ambiente. Cr (III) es un nutriente esencial para mantener el metabolismo de los lípidos, la insulina y la glucosa y su deficiencia puede conducir a la diabetes . De las muchas especies de Cr, el cromo hexavalente (Cr (VI)) es uno de los más tóxicos, especialmente cuando se compara con el cromo trivalente. Las formas carcinogénicas Cr (VI) y otras formas Cr (VI) se utilizan en diversas industrias, incluidas las industrias de curtido de cuero, galvanoplastia, pintura y metalurgia. Aunque la determinación del cromo total es importante, la especiación de los metales es mucho más importante para los estudios de impacto ambiental. La espectrofotometría es una técnica analítica bien establecida en la determinación de Cr(VI) que proporciona costo bajo y simplicidad.

El cromo es un metal utilizado en diversos procesos industriales (por ejemplo: teñido textil, curtiembres, metalurgia, electrodeposición metálica y conservación de la madera); por lo tanto, grandes cantidades de cromo se han descargado en el medio ambiente, especialmente en el pasado. En el medio ambiente, el cromo se

encuentra comúnmente en dos estados de oxidación más estables, Cr (III) y Cr (VI), cada uno caracterizado por diferente biodisponibilidad, toxicidad y comportamiento químico. El cromo hexavalente es conocido por ser tóxico para humanos, animales, plantas y microorganismos. El cromo trivalente, por otro lado, es menos tóxico y precipita fácilmente en condiciones alcalinas o incluso ligeramente ácidas. Cr (III) también puede tener efectos tóxicos, pero su concentración suele ser muy baja debido a la baja solubilidad del hidróxido de cromo en el rango de pH de las aguas naturales. Además de los efectos nocivos para los organismos que viven en el agua, el Cr (VI) también se acumula a lo largo de la cadena alimentaria y puede afectar a los seres humanos. Por lo tanto, la contaminación por Cr (VI) del agua natural se considera una preocupación ambiental importante.

Varios métodos están disponibles para la descontaminación de aguas contaminadas con Cr (VI); estos incluyen: reducción seguida de precipitación química, intercambio iónico, adsorción, separación de membrana, remediación electrocinética, ósmosis inversa, biorremediación. El procedimiento tradicional utilizado actualmente para eliminar Cr (VI) es su reducción química a Cr (III) seguida de precipitación. Los agentes reductores comúnmente utilizados son: sulfato ferroso, dióxido de azufre, sulfito sódico, metabisulfito sódico de bisulfito sódico, tiosulfato sódico. En la última década, la atención se ha centrado en utilizar hierro y aluminio cero valente para la reducción in situ de Cr (VI) del agua contaminada.

En la presente investigación se estudiará la reducción de la concentración de cromo hexavalente en agua mediante el uso de chatarra de aluminio, por ello es importante conocer los métodos de determinación de estos elementos especialmente por métodos espectrofotométricos, debido a que este es el equipo con que se dispone en los laboratorios de investigación.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. Descripción de la realidad problemática**

El cromo se usa comúnmente en una variedad de procesos industriales (Jiang et al, 2017), por lo tanto, la eliminación inadecuada de residuos de cromo y las fugas accidentales de efluentes industriales que contienen cromo provocan una contaminación grave por cromo en el entorno natural.

A diferencia de Cr (III), se sabe que Cr (VI) es tóxico y carcinógeno para humanos y animales y, por lo tanto, se incluye como un contaminante prioritario. Además, en comparación con Cr (VI), Cr (III) es menos soluble y precipita fácilmente como  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  por simple ajuste del pH de la solución. En vista de esto, la transformación de Cr (VI) a Cr (III) se conoce como el enfoque más ampliamente empleado para eliminar la toxicidad del contaminante de Cr (VI).

### **1.2. Formulación del problema**

Hasta el presente, se han desarrollado una variedad de procesos avanzados (por ejemplo: fotocátalisis, descarga eléctrica, plasma y método foto químico) para la detoxificación acuosa de Cr (VI). A pesar de la eficacia preferible en la detoxificación de Cr (VI), la mayoría de estos enfoques requieren una gran cantidad de adición de sustancias químicas o de energía y, por lo tanto, sus aplicaciones industriales están restringidas por sus costos relativamente altos. En la última década, se ha dedicado un gran esfuerzo para desarrollar y mejorar las estrategias de uso de hierro y aluminio cero Valente para la eliminación de Cr (VI).

### **1.2.1. General**

¿Cómo el uso de chatarra de aluminio cero-valente reduce la concentración de cromo hexavalente en agua?

### **1.2.2. Específicos**

- ¿Cuáles son las variables que afectan la reducción de la concentración de cromo hexavalente en agua mediante el uso de chatarra de aluminio cero-valente?
- ¿Cuáles son las condiciones para obtener la mayor reducción de la concentración de Cr(VI) en agua mediante el uso de chatarra de aluminio cero-valente?

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. General**

Reducir la concentración de cromo hexavalente en agua mediante el uso de chatarra de aluminio cero-valente.

### **1.3.2. Específicos**

- Determinar las variables que afectan la reducción de la concentración de cromo hexavalente en agua mediante el uso de chatarra de aluminio cero-valente.
- Determinar las condiciones en las cuales se obtiene la mayor reducción de la concentración de Cr(VI) en agua mediante el uso de chatarra de aluminio cero-valente.

## **1.4. Limitantes de la Investigación**

### **1.4.1. Teórico**

No hay limitantes de Investigación, ya que el proceso es una reacción redox, cuyos principios están bien establecidos.

### **1.4.2. Temporal**

Trabajo de Investigación fue programado para un año, sin limitantes de tiempo.

### **1.4.3. Espacial**

Trabajo de Investigación fue desarrollado en el laboratorio de investigación de la Facultad de Ingeniería Química, sin limitantes de tipo espacial ya que las facilidades fueron dadas por el Coordinador de laboratorio.

## II. MARCO TEORICO

### 2.1. Antecedentes

#### 2.1.1. Internacional

**Jiang (Jiang et al, 2017)** evaluó la flexibilidad de utilizar chatarra de aluminio sin valor (SZVAI) para la reducción de Cr (VI) mediada por oxalato. Sus resultados muestran que el  $H_2O_2$  producido y los electrones reactivos que se liberan del aluminio metálico fueron los principales donantes de electrones para la reducción de Cr (VI). La tasa de reducción de Cr (VI) disminuyó con el aumento del valor de pH inicial y mayor concentración inicial de Cr (VI), aumentó con la concentración de oxalato de 0 a 4.0 mM y fue notablemente retardado en condiciones anaeróbicas debido a la producción de  $H_2O_2$  completamente inhibida.

Jiang atribuye la reducción acelerada de Cr (VI) inducida por oxalato al hecho de que la afinidad del oxalato a las especies Cr (VI) / Cr (V) resulta en la expansión de la coordinación Cr (VI) / Cr (V) desde tetraedro a hexaedro.

En consecuencia, la presencia de oxalato acelera significativamente la velocidad de reducción de Cr (VI) y actúa como un donador de electrones alternativo simultáneamente para la reducción de Cr (VI) a través de la reacción de transferencia de electrones intramolecular. En comparación con el aluminio cero valente (ZVAI), SZVAI presentó una capacidad de reducción superior para la reducción de Cr (VI). Este estudio proporciona una nueva e importante perspectiva sobre el papel del oxalato en la reducción de Cr (VI).

**Lin (Lin et al, 2009)** estudia la reducción de Cr (VI) por ZVAI. El evalúa la posible aplicación de Al como reductor para Cr (VI). Emplea polioxometalato (POM,  $HNa_2PW_{12}O_{40}$ ), un catalizador, para acelerar la reducción de Cr (VI) por Al. Investigó la reacción de 0,192 mM de Cr (VI)



sobre ZVAI en presencia de  $N_2$  y  $O_2$  a pH 1. Observó una ligera disminución en la concentración de Cr (VI) en ZVAI tal como se recibió (sin limpiar) debido a la presencia de una capa de óxido con un área de superficie baja (alrededor de  $3,4 \times 10^{-3} m^2/g$ ) de ZVAI. Al agregar 0,1 mM de POM, la reducción de Cr (VI) en ZVAI sin limpiar aumentó significativamente. Esto se atribuye a las propiedades únicas de POM, que tiene una acidez Bronsted más alta que los ácidos inorgánicos habituales, como  $H_2SO_4$  y HCl. Por lo tanto, POM elimina rápidamente la capa oxidada en ZVAI, y luego actúa como un transbordador para la transferencia de electrones de ZVAI a Cr (VI). Bajo una atmósfera de  $N_2$ , la reducción de uno o dos electrones de POM por ZVAI fue responsable de la reducción de Cr (VI) en la etapa temprana de la reacción.

En la interacción de  $O_2$  con POM reducida, la formación de  $H_2O_2$  fue responsable de la posterior reducción de Cr (VI).

De esta investigación, los resultados sugieren que POM es un catalizador eficaz para la reducción de Cr (VI) por Al debido al consumo extremadamente rápido de POM o  $H_2O_2$  reducido por Cr (VI).

### **2.1.2. Nacional**

No se encontró antecedentes nacionales relacionados al tema de investigación.

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1. Metales Pesados en Agua**

Los problemas ambientales (Gunatilake, 2015) debido a la globalización y la rápida industrialización se están convirtiendo cada vez más en una molestia para el ser humano. Por lo tanto, se necesitan métodos

eficientes y efectivos, especialmente para las industrias químicas. Los metales pesados presentes en aguas residuales y efluentes industriales son una preocupación principal de la contaminación ambiental. Los metales pesados generalmente se consideran aquellos cuya densidad excede los 5 g por centímetro cúbico. La mayoría de los elementos que entran en esta categoría son altamente solubles en agua, tóxicos bien conocidos y agentes carcinógenos. Se consideran metales pesados los siguientes elementos: cobre, plata, zinc, cadmio, oro, mercurio, plomo, cromo, hierro, níquel, estaño, arsénico, selenio, molibdeno, cobalto, manganeso y aluminio.

Representan serias amenazas para la población humana y la fauna y flora de los cuerpos de agua receptores. Pueden ser absorbidos y acumulados en el cuerpo humano y pueden causar efectos graves para la salud como cáncer, daños a órganos, daño al sistema nervioso y en casos, muerte. También reduce el crecimiento y el desarrollo. Las corrientes de aguas residuales industriales que contienen metales pesados se producen en diferentes industrias. Se generan metales pesados como cadmio, zinc, plomo, cromo, níquel, cobre, vanadio, platino, plata y titanio.

Cantidad significativa de desechos de metales pesados como estaño, plomo y níquel resultado de la fabricación de placas de circuitos impresos (PCB), operaciones fotográficas que producen películas con altas concentraciones de plata y ferrocianuro. Todos estos generadores producen una gran cantidad de aguas residuales, residuos y lodos que pueden clasificarse como desechos peligrosos que requieren un amplio tratamiento de desechos. Como las bajas cantidades de estos metales son altamente tóxicas, la eliminación de metales pesados de las aguas residuales se ha convertido en tema de considerable interés debido a las estrictas legislaciones.

Se establecieron regulaciones de aguas residuales para minimizar la exposición humana y ambiental a productos químicos peligrosos. Estos incluyen límites sobre los tipos y la concentración de metales pesados que pueden estar presentes en las aguas residuales vertidas. Los estándares del Nivel Máximo Permisible para esos metales pesados establecidos por USEPA se resumen en la Tabla 1. Por lo tanto, es necesario tratar las aguas residuales contaminadas con metales antes de su descarga al medio ambiente.

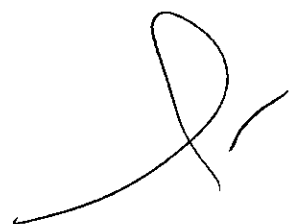
A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized initial 'D' followed by a horizontal line and a small flourish.

Tabla 1

*Estándares del nivel máximo permisible, para metales pesados, establecidos por usepa*

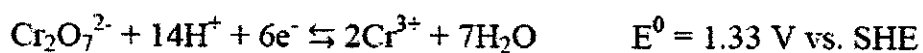
<b>Metal Pesado</b>	<b>Toxicidad</b>	<b>Nivel Máximo permisible (mg/L), según USEPA</b>
Arsénico	Manifestaciones de la piel, cánceres viscerales, enfermedad vascular	0.05
Cadmio	Daño renal, trastorno renal, carcinógeno humano	0.01
Cromo	Dolor de cabeza, diarrea, náuseas, vómitos,	0.05
Cobre	carcinógeno Daño hepático, enfermedad de	0.25
Níquel	Wilson, insomnio Dermatitis, náuseas, asma	0.20
Zinc	crónica, tos, carcinógeno humano	0.80
Plomo	Depresión, letargo, signos neurológicos y sistema nervioso Daño al cerebro fetal,	0.006
Mercurio	enfermedades de los riñones, sistema circulatorio y sistema nervioso Artritis reumatoide y enfermedades de los riñones, el sistema circulatorio y el sistema nervioso	0.00003

Fuente: Gunatilake, 2015.

### 2.2.2. Cromo en el Agua

Los estados de oxidación más importantes de Cr son +3 y +6. La toxicidad del cromo (Treviño et al, 2014) depende de su estado de oxidación: mientras que el cromo trivalente es un nutriente esencial para el metabolismo vegetal y animal en cantidades traza, se sabe que los compuestos hexavalentes son tóxicos, corrosivos y cancerígenos y causan diversos problemas de salud. Cr (VI) no presenta especies insolubles a pesar de las variaciones de pH y, por lo tanto, sus iones son extremadamente móviles en el agua y el suelo. Por otro lado, el estado trivalente forma especies insolubles en un amplio rango de pH. Por lo tanto, para formar una fase sólida de cromo a menudo es necesario modificar el estado de oxidación.

En su estado trivalente, el cromo forma complejos fuertes con hidróxidos. Las especies de hidroxilo dominantes son  $\text{CrOH}^{2+}$  a valores de pH de 3.8 a 6.3,  $\text{Cr(OH)}_3$  a valores de pH de 6.3 a 11.5, y  $\text{Cr(OH)}_4^-$  a valores de pH > 11.5. Debido a que el potencial redox de la pareja Cr (VI) / Cr (III) es bastante alto, hay pocos oxidantes presentes en los sistemas naturales capaces de oxidar Cr (III) a Cr (VI):



El cromo (VI) se utiliza en una variedad de aplicaciones que incluyen electrodeposición, producción de acero, acabado de metales, producción de tinte y enfriamiento con agua. Las regulaciones de EE. UU. Han establecido los siguientes límites para las descargas de cromo: 170 mg / l de Cr (III) y 0,05 mg / l de Cr (VI). La regulación del Agua Potable de la EPA de EE. UU, limita el contenido total de cromo a 0.1 mg / L o menos. La solubilidad de  $\text{Cr(OH)}_3$  mantiene las concentraciones de cromo por debajo del límite de agua potable a pH 6-12.

Las estrategias de tratamiento para las especies indeseables de cromo incluyen la reducción química tradicional, métodos electroquímicos (incluyendo electrocoagulación y electrodisolución), reducción fotocatalítica y reducción biológica. En general, los métodos químico y electroquímico requieren que el proceso tenga lugar en condiciones ácidas para que los iones de cromo permanezcan en la fase acuosa donde tienen lugar las reacciones. Cuando se eleva el pH de la solución, precipitan los hidróxidos de cromo. Por otro lado, los métodos biológicos requieren menos reactivos (principalmente fuentes de carbono) y, por lo tanto, son más simples; aunque algunas bacterias y hongos acuáticos son relativamente tolerantes a los niveles elevados de Cr (VI), es un oxidante fuerte y en cierto nivel ataca a los microbios en sus membranas y tejidos.

Los metales cero valentes pueden servir como donantes de electrones para la reducción de especies oxidadas bajo ciertas condiciones. La inestabilidad termodinámica del metal puede conducir a reacciones de oxidación-reducción sin entrada de energía externa, si pueden ocurrir reacciones acopladas adecuadas para evitar la acumulación de carga eléctrica.  $\text{CrO}_4^{2-}$  puede servir como oxidante en este esquema de reacción y reducirse.

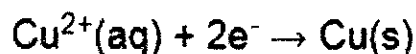
### **2.2.3. Reacciones de Oxidación Reducción**

La oxidación es un aumento algebraico del estado de oxidación y corresponde a la pérdida de electrones. La reducción es una disminución algebraica del estado de oxidación y corresponde a la ganancia de electrones. Implicados en estos procesos, están los electrones que ni se crean ni se destruyen. Así que las reacciones de oxidación y reducción siempre ocurren simultáneamente y en la misma extensión. Para abreviar, habitualmente a este tipo de reacciones las llamamos reacciones redox.

Las reacciones redox implican transferencias de electrones; si una especie gana electrones, otra especie (o más de una especie) debe perder electrones. Por ejemplo, la reacción redox en la que el zinc desplaza al cobre en una solución acuosa de sulfato de cobre:



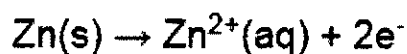
En términos de electrones está dada por:



Reducción of  $\text{Cu}^{2+}_{(\text{aq})}$

En esta reacción el  $\text{Cu}^{2+}$  es un agente oxidante, que son especies que oxidan a otras sustancias, son reducidas y ganan electrones.

Y:



Oxidación of  $\text{Zn}(\text{s})$

En esta reacción el Zn es un agente reductor, que son especies que reducen a otras sustancias, se oxidan y pierden electrones.

#### 2.2.4. Procesos de tratamiento empleando aluminio cero-valente

Los metales (Nidheesh et al, 2018) cero valentes (ZVM) se usan ampliamente para eliminar metales pesados, contaminantes, toxicidad, etc. del agua y aguas residuales. El aluminio cero-valente (ZVAI) tiene

una gran superficie y alta reactividad superficial. Tiene una enorme flexibilidad para la aplicación in situ. ZVAI se puede aplicar como un sistema único o bimetálico así como también para procesos avanzados de oxidación (AOP). Se observa que ZVAI es capaz de generar radicales hidroxilo y sulfato en medio acuoso, que eliminan contaminantes no biodegradables de la solución acuosa. Los procesos basados en ZVAI pueden eliminar contaminantes orgánicos no biodegradables del medio acuoso en una corta duración. ZVAI también se usa como agente reductor. Es eficiente para reducir el cromo hexavalente tóxico a cromo trivalente menos tóxico. En general, se puede concluir que los métodos basados en ZVAI para el tratamiento del agua y de las aguas residuales son tecnologías ambientales prometedoras.

El aluminio es un metal presente en la corteza terrestre que forma aproximadamente el 8% de su masa total. La aplicación de aluminio en el campo de tratamiento de agua y aguas residuales ha sido tradicionalmente limitada como coagulante. El alumbre, una sal de aluminio, es un coagulante muy conocido y ampliamente utilizado, especialmente para el tratamiento del agua. Su rendimiento óptimo a pH neutro y la ausencia de complejo de formación de color hace que el alumbre sea un coagulante popular. Pero, recientemente, la aplicación de ZVAI ha recibido considerable atención en el campo del tratamiento de agua y aguas residuales debido a su alta reactividad. Las aplicaciones de ZVAI en agua y tratamiento de aguas residuales se pueden dividir en tres tipos: sistema único, sistema bimetálico y procesos avanzados de oxidación (AOP). ZVAI es un poderoso agente reductor y adsorbente. Los investigadores han usado esta propiedad para eliminar contaminantes del agua. También han observado el rendimiento de ZVAI cambiando las condiciones y comparando con otras ZVM mediante el uso de sistemas bimetálicos. Recientemente, los investigadores han descubierto que ZVAI



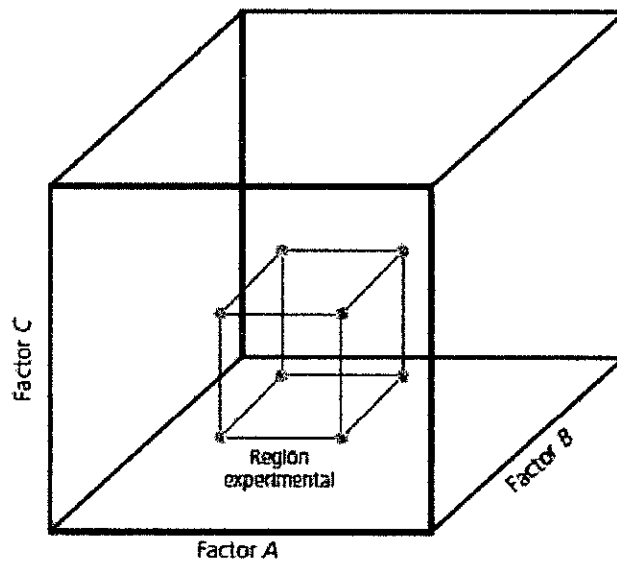
es capaz de generar radicales hidroxilo y sulfato en medio acuoso, promoviendo la eliminación de contaminantes no biodegradables.

### **2.2.5. Metodología de superficie de respuesta**

La Metodología de Superficie de Respuesta es la estrategia experimental y de análisis que permite resolver el problema de encontrar las condiciones de operación óptimas de un proceso, es decir, aquellas que dan por resultado “valores óptimos” de una o varias características de la variable respuesta.

Para ello es importante definir la región experimental y la región de operabilidad. La *región experimental* es el espacio delimitado por los rangos de experimentación utilizados con cada factor. La *región de operabilidad* está definida por el conjunto de condiciones donde el proceso puede ser operado. Es difícil delimitar con certeza el tamaño de la región de operabilidad, ya que aun cuando se conozca el rango en el que se puede colocar cada factor individual, es necesario determinar esos límites considerando varios factores de manera simultánea. La región de operabilidad considera todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores en los que el proceso puede operarse y ésta siempre es igual o más grande que la región experimental. Para mayor sencillez se consideran regiones de forma regular, como se muestra en la figura 1.





**Figura 1. Regiones de operabilidad (cubo mayor) y experimental.** Fuente: Gutiérrez Pulido, 2012

En la Metodología de Superficie de Respuesta es importante tener presente esta visión de las regiones de operabilidad y experimental, ya que, en principio, el punto óptimo que interesa encontrar pudiera localizarse en cualquier lugar de la región de operabilidad, dentro o fuera de la región experimental inicial. En procesos ya establecidos y muy estudiados, es de esperarse que dicho punto óptimo se encuentre “no muy lejos” de las condiciones de operación usuales, posiblemente dentro de la región experimental inicial. En cambio, cuando el proceso es nuevo o cuando se está escalando o rediseñando, es más probable que el punto de interés se ubique fuera de la primera región experimental propuesta para el experimento inicial, y en ese caso primero será necesario acercarse a dicho punto para luego “atraparlo”.

La metodología de superficie de respuesta implica tres aspectos: *diseño*, *modelo* y *técnica de optimización*. El diseño y el modelo se piensan al mismo tiempo, y dependen del tipo de comportamiento que se espera en la respuesta. De manera específica, el modelo puede ser de primero o segundo orden (plano o con curvatura); por ello, el tipo de diseño utilizado y el modelo se clasifican, según sea el caso, como de primero o segundo orden.

El aspecto *diseño* implica que para optimizar un proceso se debe aplicar el *diseño de experimentos*, en particular aquellos que sirven para ajustar un *modelo de regresión lineal múltiple*.

El aspecto del *modelo* utiliza el *análisis de regresión lineal múltiple*, junto con sus elementos básicos que son: parámetros del modelo, modelo ajustado, significancia del modelo, prueba de falta de ajuste, residuos, predichos, intervalos de confianza para predichos y coeficiente de determinación.

El aspecto de *optimización* está formado por algunas técnicas matemáticas que sirven para que, dado un modelo ajustado, explorarlo a fin de obtener información sobre el punto óptimo.

En la figura 2 se presenta un esquema de la metodología de superficie de respuesta, donde se distinguen tres etapas en la búsqueda del punto óptimo, que son: *cribado*, *búsqueda I o de primer orden* y *búsqueda II o de segundo orden*.

Se describe cada una de estas etapas:

1. *Cribado*. La optimización de un proceso se inicia con esta etapa cuando tiene muchos factores que posiblemente influyen en la variable de interés.

2. *Búsqueda I o de primer orden.* Esta etapa se aplica cuando se tienen pocos factores ( $k < 5$ ), y se sabe que éstos influyen en la variable de respuesta.

En esta etapa se corre un diseño de primer orden que permita caracterizar en forma preliminar el tipo de superficie de respuesta y detectar la presencia de curvatura. Por lo general se utiliza un diseño factorial completo o fraccionado con *repeticiones al centro*.

3. *Búsqueda II o de segundo orden.* En el momento en el que se detecta la presencia de curvatura, o bien, que la superficie es más complicada que un hiperplano, se corre o se completa un diseño de segundo orden para caracterizar mejor la superficie y modelar la curvatura. Con el modelo ajustado se determinan las condiciones óptimas de operación del proceso.



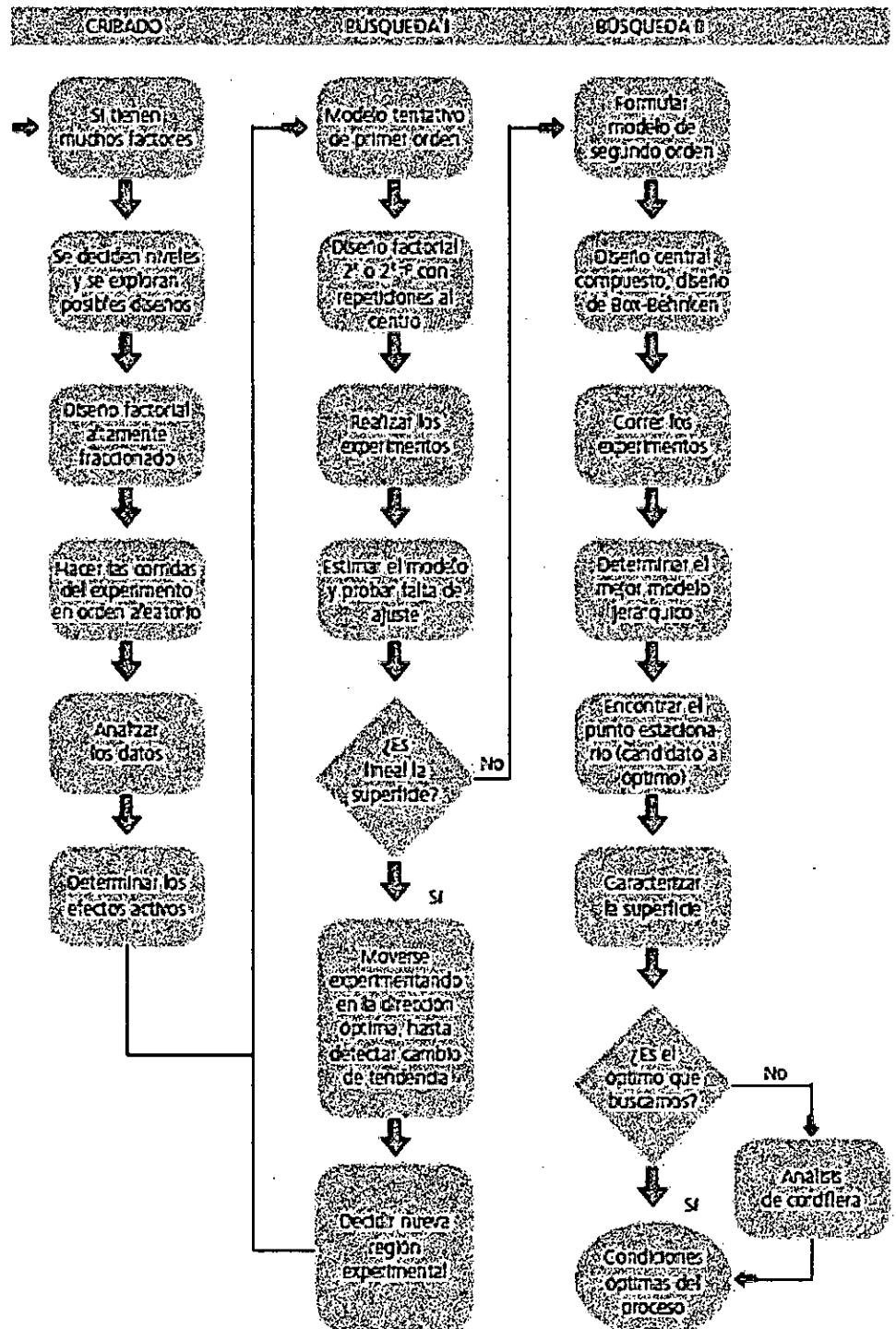


Figura 2. Esquema de los elementos de la metodología de superficie de respuesta en su contexto amplio.

Fuente: Gutiérrez Pulido, 2012

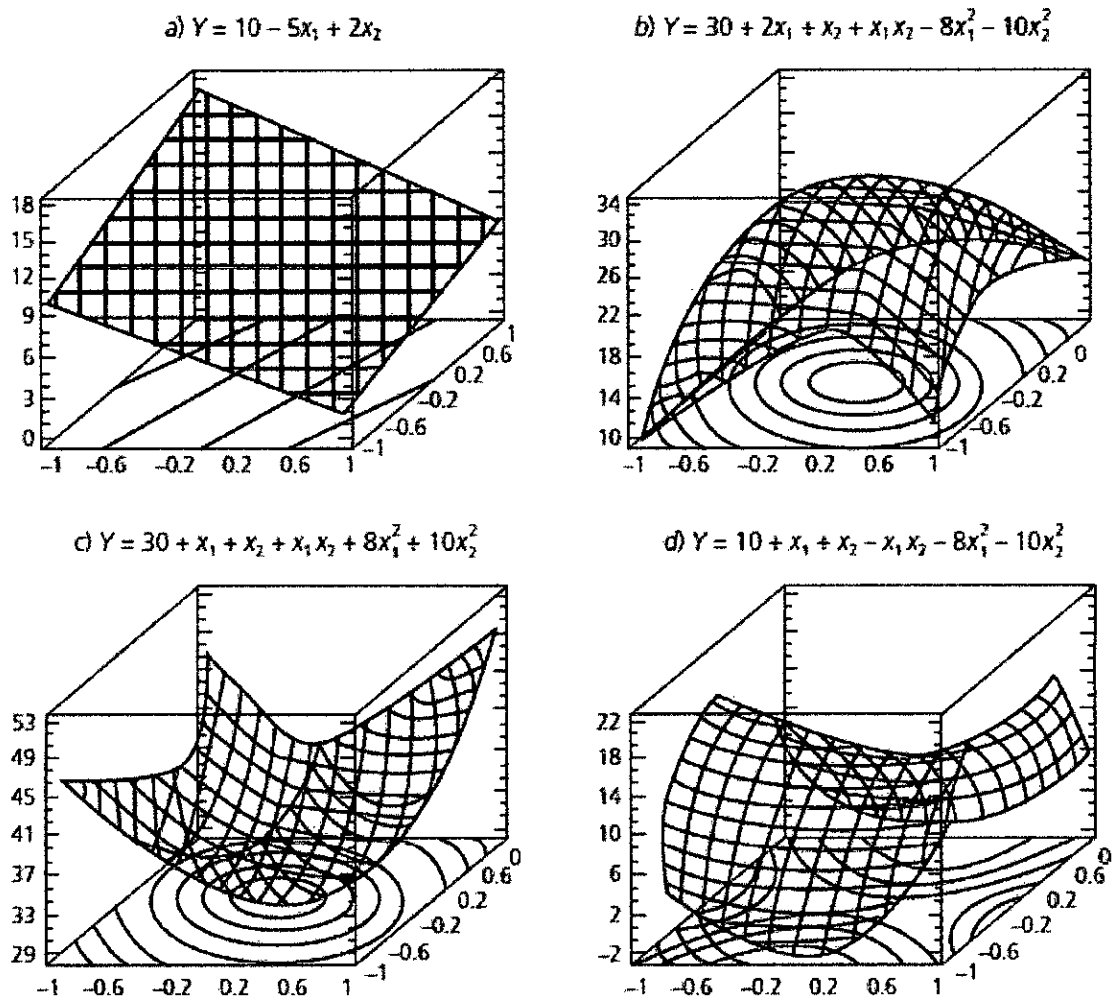
Las superficies de respuesta se caracterizan ajustando un modelo a los datos experimentales. Los modelos que se utilizan en MSR son básicamente polinomios. De esta manera, si se tienen  $k$  factores, el *modelo de primer orden* está dado por:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon$$

y el *modelo de segundo orden* es:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

En la figura 3 se muestran las gráficas para los modelos dados por las ecuaciones en los que se consideran dos variables de proceso  $x_1$  y  $x_2$ , así como diferentes valores de los parámetros. La figura 3a) representa un modelo de primer orden y se observa que su superficie es un plano. En las figuras 3b), c) y d) se representan varios modelos de segundo orden. La forma específica que toma la superficie depende de los signos y magnitudes de los coeficientes en el modelo. En las figuras se representan las tres formas básicas, que son: b) superficie de máximo (montaña), c) superficie con mínimo (valle) y d) superficie con punto silla (minimáx).



**Figura 3. Superficies de respuesta: a) descrita por un modelo de primer orden; b), c) y d) descritas por modelos de segundo orden.**

Fuente: Gutiérrez Pulido, 2012

Una vez que se tiene el modelo debidamente ajustado y validado, se procede a explorar la superficie descrita por el modelo para encontrar la combinación de niveles en los factores que dan por resultado un valor óptimo de la respuesta.

Los *diseños de superficie de respuesta* se clasifican con base en el grado del modelo que se pretende utilizar. Estos diseños proporcionan los tratamientos a correr para generar datos que permitan ajustar un modelo que describa una variable de respuesta en una región experimental. Algunas propiedades deseables en los diseños para la MSR son:

1. Que genere una distribución satisfactoria de los puntos experimentales sobre la región experimental. Los diseños más utilizados son puntos distribuidos de manera uniforme sobre la región experimental, o cuando menos tienen alguna simetría con respecto al centro de ésta.
2. El diseño debe requerir un número mínimo de corridas experimentales, ya que en cada prueba realizada se gastan recursos que siempre son escasos.
3. El diseño debe permitir que otros diseños de orden mayor se construyan a partir de él. Esto permite que, cuando el comportamiento de la respuesta resulta ser más complicado de lo que se pensaba (por ejemplo, se detecta curvatura), se agregan puntos adicionales al diseño para tratar de explicar ese comportamiento.
4. El experimento debe permitir la detección de la falta de ajuste, para lo cual se requieren repeticiones al menos en el centro del diseño.
5. El diseño debe proporcionar un estimador puro de la varianza del error, lo cual se logra con repeticiones al menos en el punto central. Otras dos propiedades deseables en los diseños para superficie de res puesta son la *ortogonalidad* y la *rotabilidad*. Estas propiedades aumentan la eficiencia de los diseños que las poseen, en el sentido de que facilitan la interpretación de los parámetros estimados en el modelo y de la superficie de respuesta.



## Ortogonalidad y rotabilidad

Se considera que un *diseño* es *ortogonal* cuando los coeficientes estimados en el modelo ajustado no están correlacionados entre sí, lo cual hace que el efecto de cada término, representado por el parámetro correspondiente, se estime de manera más precisa. Un *experimento* es *ortogonal* si en la matriz de diseño todos los vectores columna son independientes entre sí. Es fácil verificar que en un diseño factorial completo  $2^k$  las columnas de su matriz de diseño son independientes: multiplique dos columnas cualesquiera, término a término usando la notación  $-1$  y  $+1$ , y el resultado es cero.

Un *diseño* se llama *rotable* si la varianza de  $\hat{Y}(x)$  sólo depende de la distancia del punto  $x$  al centro del diseño y no de la dirección en la que se encuentra. Es decir, si pensamos en la variable  $\text{var}[\hat{Y}(x)]$  como otra respuesta, su gráfica de contornos tiene la forma de círculos concéntricos alrededor del centro del diseño. La rotabilidad del diseño asegura que la calidad de la predicción, medida por  $\text{var}[\hat{Y}(x)]$ , sea invariante a cualquier rotación del diseño alrededor del centro del mismo; de aquí se deriva el nombre de esta propiedad.

La importancia práctica de la rotabilidad en el problema de encontrar un punto óptimo es porque asegura que, con independencia de la dirección en la que se explore a partir del centro del diseño, la calidad de predicción se comporta de igual manera.

## Relación modelo-diseño

Existe una relación directa entre el tipo de modelo que se pretende ajustar y el tipo de diseño que se debe correr. No se debe exigir a un diseño experimental más información de la que puede dar.

### **Diseños de primer orden**

Diseño para ajustar modelos en los que sólo son importantes los efectos principales y no existen efectos de interacción.

### **Diseños de segundo orden**

Se llaman *diseños de segundo orden* aquellos que permiten ajustar un modelo de segundo orden para así estudiar, además de los efectos lineales y de interacción, los efectos cuadráticos o de curvatura pura. Por consiguiente, estos diseños se emplean cuando se quiere explorar una región que se espera sea más compleja o cuando se cree que el punto óptimo ya se encuentra dentro de la región experimental.

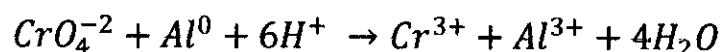
En esta investigación se plantea el diseño experimental para el estudio de las variables importantes de proceso y la optimización del proceso de reducción de la concentración de cromo hexavalente en agua mediante el uso de chatarra de aluminio cero-valente.

Se empleará metodología de superficie de respuesta para obtener que variables son importantes y preponderantes en el proceso de reducción de concentración de cromo, así como para optimizar el tratamiento.

Se empleará software estadístico para generar el diseño experimental para el estudio.

### **2.3. Conceptual**

Se utilizará la reacción de oxidación –reducción dada por:



El aluminio cero Valente (ZVAI) es un agente reductor fuerte con un potencial de reducción estándar de  $E^0(\text{Al}^{3+}/\text{Al})=-1,662$  que provee de una fuerza potencial termodinámica grande para la transferencia de electrones y puede ser empleado para la descontaminación reductiva de Cr(VI).

#### **2.4. Definición de términos básicos**

##### **Cromo (VI)**

Compuesto hexavalente tóxico, cancerígeno y causa diversos problemas de salud como dolor de cabeza, diarrea, náuseas, vómitos.

##### **Metal cero valente**

Los metales cero valentes pueden servir como donantes de electrones para la reducción de especies oxidadas bajo ciertas condiciones.

##### **Aluminio cero valente**

El aluminio cero-valente (ZVAI) tiene una gran superficie y alta reactividad superficial. ZVAI es un poderoso agente reductor y adsorbente.

##### **Reduccion-oxidacion**

Una reacción de reducción-oxidación es una reacción química en la que uno o más electrones se transfieren entre los reactivos, provocando un cambio en sus estados de oxidación. Para que exista una reacción de reducción-oxidación, en el sistema debe haber un elemento que ceda electrones, y otro que los acepte.

### **Agente oxidante**

Es el elemento químico que tiende a captar electrones, quedando con un estado de oxidación inferior al que tenía.

### **Agente reductor**

Es el elemento químico que suministra electrones de su estructura química al medio, aumentando su estado de oxidación. Cuando un elemento químico es reductor, cede electrones al medio y se convierte en un elemento oxidado.



### **III. Hipótesis y Variables**

#### **3.1. Hipótesis**

##### **3.1.1. General**

La reducción de la concentración de cromo hexavalente en agua de 60 % mediante el uso de chatarra de aluminio cero-valente,

##### **3.1.2. Específicas**

•Las variables que afectan la reducción de la concentración de cromo hexavalente en agua mediante el uso de chatarra de aluminio cero-valente son pH de solución y la temperatura.

•Las condiciones en las cuales se obtiene la mayor reducción de la concentración de Cr(VI) en agua mediante el uso de chatarra de aluminio cero-valente a pH bajo, temperatura alta y con pretratamiento del aluminio cero Valente con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1N por 15 minutos.

#### **3.2. Definición Conceptual de variables**

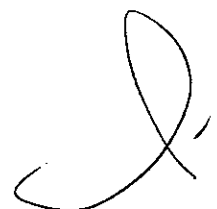
**Variable dependiente:**

**Y= concentración de Cr(VI) en el agua**

**Definición Conceptual:** Es la medición de la concentración del metal en el agua en ppm (partes por millón, mg/L). Esta determinación se realiza empleando método espectrofotométrico a 540 nm.

**Variables independientes:**

**X1= Velocidad de agitación**



**Definición Conceptual:** Velocidad de rotación del líquido a través del empleo de una barra magnética. Se mide en rpm.

**X2= Efecto de pre tratamiento sobre aluminio cero-valente**

**Definición Conceptual:** Un pretratamiento es una etapa previa que se realiza con la sustancia, en este caso generalmente para aumentar su eficacia en el tratamiento del agua.

**X3= pH de solución**

**Definición Conceptual:** El pH de una solución es una medida de la concentración molar de iones de hidrógeno en la solución y, como tal, es una medida de la acidez o la basicidad de la solución.

**X4= tiempo de tratamiento**

**Definición Conceptual:** Es el tiempo en minutos que tarda el tratamiento. Se mide con un reloj o un cronómetro

**X5= Temperatura**

**Definición Conceptual:** La *Temperatura* es una magnitud que mide el nivel térmico o el calor que un cuerpo posee. Se mide con un termómetro, generalmente en °C.

**X6= Cantidad de aluminio cero Valente**

**Definición Conceptual:** Es la cantidad de aluminio en g/L que se emplea en el tratamiento.

**3.2.1. Operacionalización de variables**

La operacionalización de variables se muestra en la Tabla 2.



Tabla 2

*Operacionalización de variables*

Variable	Dimensiones	Indicadores	Método de determinación
<b>Variable Dependiente:</b>			
Concentración de Cr(VI) en el agua		ppm	Espectrofotométrico. Con medidas de longitud de onda a 540 nm
<b>Variable independiente:</b>			
Uso de aluminio cero valente	pH de solución	-log[H <sup>+</sup> ]	Potenciómetro
	Velocidad de agitación	rpm	Regulación de perilla en equipo de agitación magnética.
	Temperatura	°C	Regulación con baño maría.
	Pretratamiento de aluminio cero Valente	molaridad	Inmersión de aluminio cero Valente en solución de HCl de diferentes concentraciones.
	Cantidad de aluminio cero Valente	g	Balanza Analítica
	Tiempo de tratamiento	min	Reloj o Cronómetro

Fuente: Elaboración Propia

#### IV. Diseño Metodológico

##### 4.1. Tipo y diseño de Investigación

El tipo de investigación es experimental

##### 4.2. Método de Investigación

El diseño metodológico de la investigación consistió en las siguientes etapas:



1. Tratamiento de Cr(VI) con chatarra de aluminio de las latas de gaseosa

En la tabla 3 se muestra las variables (factores) y niveles (valores) considerados para cada variable.

Tabla 3

*Variables y niveles considerados prueba chatarra de aluminio latas de gaseosa*

<b>VARIABLES</b>	<b>Nivel inferior (-1)</b>	<b>Nivel medio (0)</b>	<b>Nivel Superior (+1)</b>
pH	2	3,5	5
Temperatura (°C)	25	35	45
Tiempo de reacción(min)	30	60	90
Masa inicial de aluminio (g)	1	3	5
Velocidad de agitación (rpm)	600	800	1000
Con, HCl trat Al (N)	0,5	1,0	1,5

Fuente: Elaboración Propia

Se realizó pruebas de acuerdo al diseño experimental dado en la tabla 4 para ver el efecto de las variables en la reducción de Cr(VI).





Tabla 4

*Diseño experimental prueba chatarra de aluminio latas de gaseosa*

Nro Prueba	Bloque	vel agit	conc trat HCl	pH	tiempo rx	temp	masa Al	conc Cr6
1	1	600	1,5	3,5	30	25	5	
2	1	800	1	3,5	60	35	3	
3	1	1000	0,5	3,5	90	45	1	
4	1	600	0,5	5	90	35	1	
5	1	1000	1,5	2	30	35	5	
6	1	800	0,5	2	30	25	1	
7	1	600	0,5	5	30	45	5	
8	1	800	1,5	5	90	45	5	
9	1	1000	1,5	2	90	25	1	
10	2	800	1	3,5	60	35	3	
11	2	1000	0,5	2	60	45	5	
12	2	600	0,5	2	90	25	5	
13	2	1000	0,5	5	30	25	3	
14	2	600	1,5	2	90	45	3	
15	2	1000	1,5	5	30	45	1	
16	2	600	1,5	5	60	25	1	
17	2	600	1	2	30	45	1	
18	2	1000	1	5	90	25	5	

Fuente: Propia

2. Tratamiento de Cr(VI) con chatarra de aluminio de los refrigerantes de las placas de PC.

En la tabla 5 se muestra las variables (factores) y niveles (valores) considerados para cada variable.



Tabla 5  
*Variables y niveles considerados refrigerante placa base de PC*

<b>VARIABLES</b>	<b>Nivel inferior (-1)</b>	<b>Nivel medio (0)</b>	<b>Nivel Superior (+1)</b>
pH	2	4	6
Temperatura (°C)	20	30	40
Tiempo de reacción(min)	40	80	120

Fuente: Elaboración Propia

Se realizó pruebas de acuerdo al diseño experimental de cribado definitivo dado en la tabla 6 para ver el efecto de las variables en la reducción de Cr(VI).



Tabla 6

*Diseño experimental prueba chatarra de aluminio  
refrigerante placa base de PC*

Nro Prueba	Bloque	temp	pH	tiempo rx	conc Cr6
1	1	30	4	80	
2	1	40	2	80	
3	1	20	6	80	
4	1	40	6	40	
5	1	30	6	120	
6	1	40	6	40	
7	1	20	2	120	
8	1	30	2	40	
9	1	20	2	120	
10	2	40	4	120	
11	2	20	6	120	
12	2	40	2	120	
13	2	20	4	40	
14	2	20	2	40	
15	2	30	4	80	
16	2	20	6	40	
17	2	40	6	120	
18	2	40	2	40	

Fuente: Elaboración Propia

### 4.3. Población y muestra

La población es agua con contenido de Cr(VI) de concentración definida que es sometido a tratamiento empleando aluminio cero valente.



Para la determinación de Cr(VI) se tomó muestras de 1 ml luego del tratamiento, que luego se analizó espectrofotométricamente.

#### **4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado**

Laboratorio de Investigación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao.

#### **4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la Información**

Se empleó método espectrofotométrico en el espectrofotómetro Varian 50 para la recolección de datos.

Para determinar Cr(VI) se utilizó el método 8023 de Hach para cromo hexavalente que emplea 1,5-Difenilcarboxidrazida y se aplica en el rango de 0,03 a 0,7 mg/L de Cromo.

En el método, el cromo hexavalente reacciona con 1,5-difenilcarbazona para formar 1,5-difenilcarbazona. La cantidad de color rojo formado con cromo hexavalente es directamente proporcional a la cantidad de cromo en la muestra. La longitud de onda de medición es 540 nm.

#### **4.6. Análisis y procesamiento de datos**

Para el análisis de datos se empleó software estadístico.



## V. Resultados

### 5.1. Resultados Descriptivos

#### 5.1.1. Preparación de curva de calibración

Se realizó la determinación experimental de la curva de calibración, que fue empleado para cuantificar la concentración de Cr(VI) en las pruebas experimentales. Para determinar Cr(VI) se utilizó el método 8023 de Hach para cromo hexavalente que emplea 1,5-Difenilcarboxidrazida y se aplica en el rango de 0,03 a 0,7 mg/L de Cromo.

En el método, el cromo hexavalente reacciona con 1,5-difenilcarbazona para formar 1,5-difenilcarbazona. La cantidad de color rojo formado con cromo hexavalente es directamente proporcional a la cantidad de cromo en la muestra. La longitud de onda de medición es 540 nm.

#### Materiales y métodos

Se empleó como materiales:

Filas de 100 ml, 500 ml y 1 L

Vaso de precipitado de 500 ml

Picetas

Pipetas de 1 ml, 5 ml y 10 ml

Se empleó como equipos:

Balanza Analítica

Espectrofotómetro

Se empleó como reactivos:

- Agua destilada
- $K_2Cr_2O_7$
- Kits Hach para determinación de Cr(VI)



## Procedimientos:

### 1. Preparación de soluciones de calibración

- Para preparar la solución madre estándar,  $K_2Cr_2O_7$  se secó a  $150\text{ }^\circ\text{C}$  durante una hora y luego se colocó en un desecador.
- Se pesó 141,1 mg de  $K_2Cr_2O_7$  y disolvió en agua y diluyó hasta conseguir 100 ml en una fiola. Esta es una solución stock de 500 mg Cr(VI)/L.
- A partir de la solución previa, se preparó una solución estándar de 5 mg/L. Para ello se diluyó 1 ml de la solución stock de 500 mg/L a 100 ml en una fiola.
- A partir de esta segunda solución se preparó las soluciones de calibración de acuerdo a la tabla 7.

Tabla 7

*Soluciones de calibración*

<b>SOLUCIÓN</b>	<b>Cantidad de solución estándar de Cromo (5 mg/L) en 100 ml</b>	<b>Concentración de solución Cr(VI) en ppm</b>
Blanco	0	0
Solución calibración 1	1 ml	0,05
Solución calibración 2	2 ml	0,1
Solución calibración 3	3 ml	0,15
Solución calibración 4	4 ml	0,2
Solución calibración 5	6 ml	0,3
Solución calibración 6	10 ml	0,5
Solución calibración 7	14 ml	0,7

*Fuente: Método 8023 Hach.*

## **Curva de Calibración**

La reacción cromogénica de las soluciones de cromato se deja equilibrar a temperatura ambiente. Un paquete del reactivo Hach (método 8023) utilizado para el análisis del agua con Cr (VI) se añade a las soluciones de la curva de calibración inmediatamente después de la apertura ya que el reactivo es higroscópico y se deteriora con el tiempo. La botella de la solución de análisis se agita a mano durante aproximadamente 60 segundos hasta que se disuelve por completo. La mezcla incompleta no proporciona una reacción cromogénica adecuada y tendrá un efecto sobre los valores de absorbancia obtenidos para la reacción del reactivo. El reactivo granular permanecerá incluso si el reactivo se disuelve perfectamente en la solución. El resto se precipita en el fondo de la celda y no influye en las mediciones de absorción.

El reactivo cromogénico se añade a la solución inmediatamente después de la apertura, se mezcla durante un minuto, y se mide el tiempo de reacción en el máximo de absorción de 540 nm. Aquí, se asume 90 segundos como el tiempo de retraso después de la adición del reactivo hasta el inicio de la medición de la absorción. La reacción cromogénica se completa aproximadamente 150 segundos después de comenzar la medición basada en el tiempo (4 minutos después de la adición del reactivo). Además, el color del reactivo se estabiliza 480 segundos después de comenzar la medición (8 minutos después de la adición del reactivo).

La curva de calibración se crea en base a lecturas a 540 nm.

## **Procedimiento construcción curva de calibración**

1. Use una pipeta para agregar 10 ml de muestra al vial de prueba.



2. Coloque una DosiCap B naranja en el vial.
3. Apriete la tapa en el vial e invierta el vial 2-3 veces.
4. Coloque el vial en la gradilla de tubos de ensayo durante 8 minutos.
5. Cuando el temporizador expire, invierta el vial 2-3 veces.
6. Leer la absorbancia en el equipo.
7. Proceder de la misma manera para el resto de soluciones. Los resultados se muestran en mg/L Cr.

## Resultados

Resultados de lecturas en el espectrofotómetro se muestran en la tabla 8.

Tabla 8  
*Resultados de lecturas de absorbancia en espectrofotómetro*

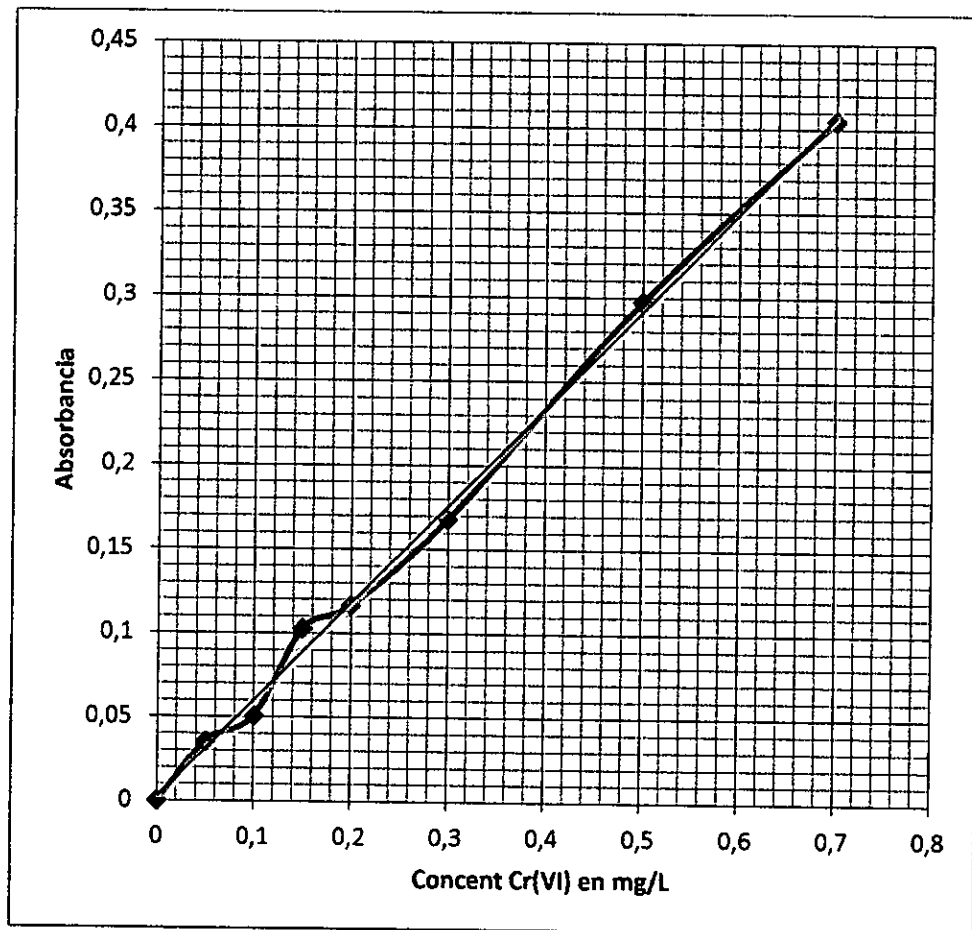
<b>Sol. Estándar de Cr(VI), mg/L</b>	<b>Absorbancia</b>
0	0,0002
0,05	0,0354
0,1	0,0510
0,15	0,1029
0,2	0,1167
0,3	0,1683
0,5	0,2977
0,7	0,4050

*Fuente: Elaboración Propia*

En la figura No 4, se muestra los resultados obtenidos en Excel para la regresión Lineal de datos.







**Figura 4. Datos curva de calibración y ajuste de regresion lineal en excel. Fuente: Elaboración Propia**

La ecuación de calibración está dada por:

$$C_{Cr(VI), \text{ mg/L}} = 0,59126 * \text{Abs}$$

Donde:

$C_{Cr(VI), \text{ mg/L}}$ , representa la concentración de Cromo en miligramos por litro en la muestra.

Abs, es la absorbancia leída en el espectrofotómetro a 540 nm.

En la figura 5 se muestra una captura de pantalla del proceso de calibración realizado en el espectrofotómetro Varian del laboratorio de Investigación.

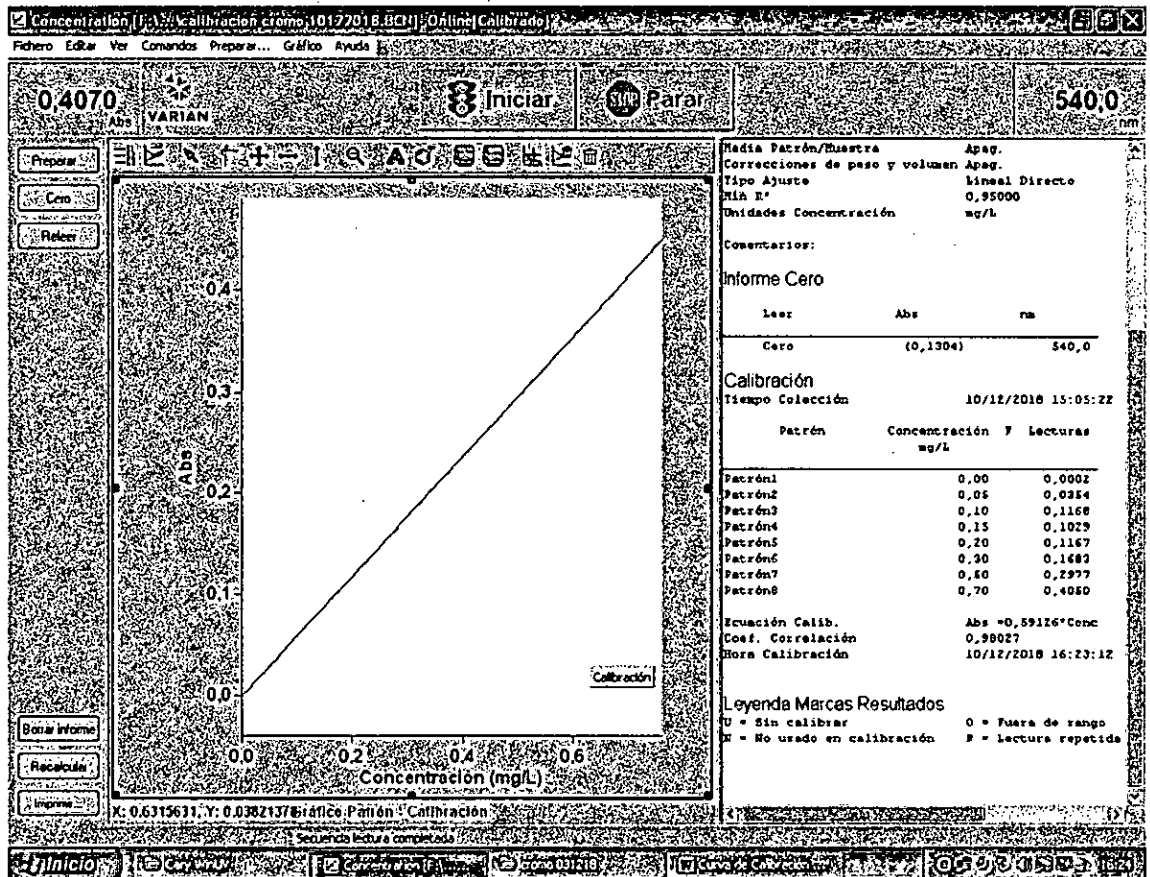


Figura 5. Pantalla curva de calibración en el espectrofotómetro varian del laboratorio de investigación.

Fuente: Espectrofotómetro Varian.

### 5.1.2. Resultados diseño experimental para chatarra de aluminio de latas de gaseosa

Se investigó la capacidad de reducción de Cr(VI) por parte de chatarra de aluminio que tiene como origen latas de bebidas.

Las latas fueron envases de bebidas de aluminio descartados y se procedió a cortarlos en trozos pequeños de 0,5 cm x 1 cm como se muestran en las figuras 6.



**Figura 6. Latas de aluminio desechadas siendo cortadas.**  
Fuente. Elaboración propia

Estas latas de aluminio cortadas, fueron sometidas a un pre-tratamiento con ácido clorhídrico a tres concentraciones (0,5 N, 1 N y 1,5 N) por una hora para retirar capa de óxidos como se muestra en las figuras 7 y 8.



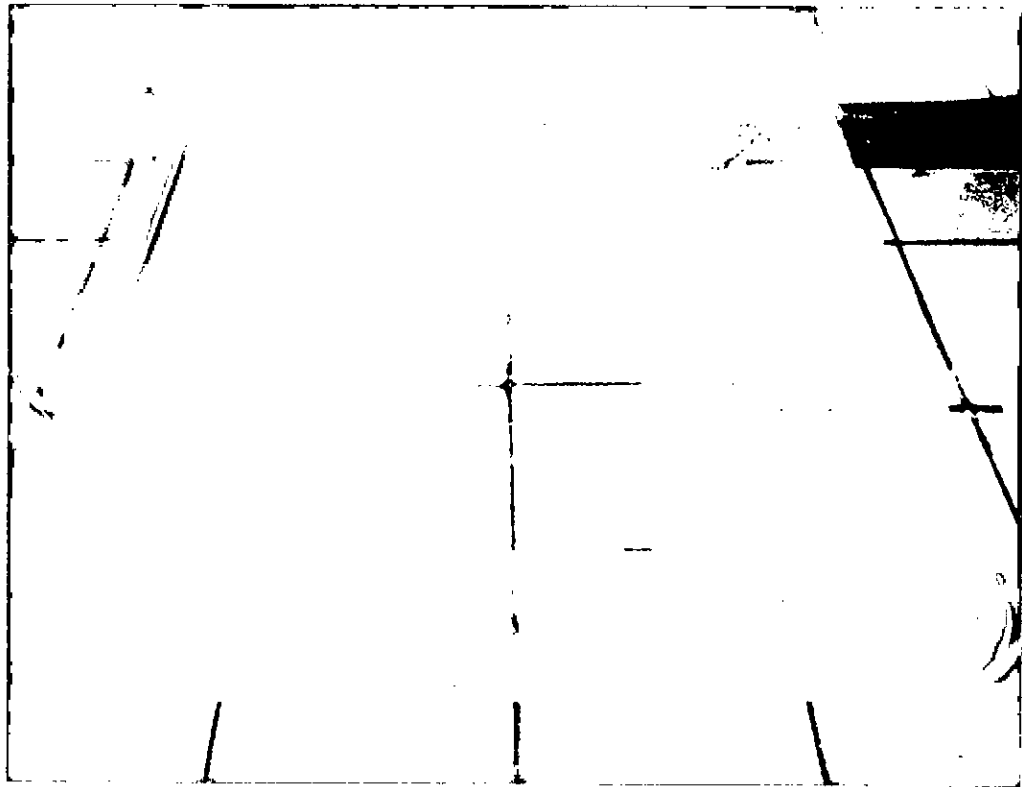
**Figura 7. Muestras de chatarra de aluminio para su pretratamiento con soluciones de HCl. Fuente. Elaboración propia**

A handwritten signature or mark consisting of a large, stylized loop followed by a short horizontal line.



**Figura 8. Pre-tratamiento de chatarra de aluminio con ácido clorhídrico a tres concentraciones (0,5 N, 1 N y 1,5 N).  
Fuente. Elaboración Propia**

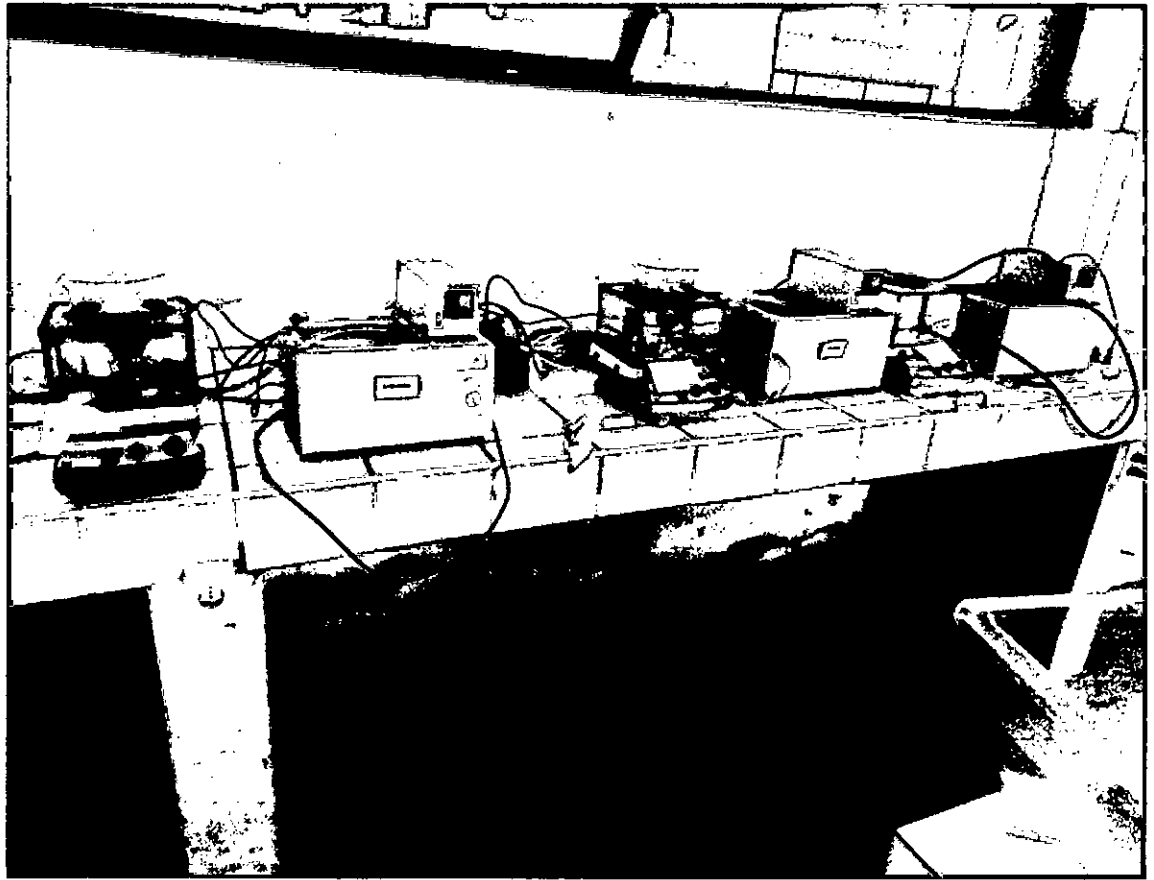
Para las pruebas experimentales, se preparó 20 L de solución de Cromato de Potasio ( $K_2CrO_4$ ) como fuente de Cr(VI). La concentración de la solución inicial fue de 22,5 mg  $Cr^{6+}/L$ . El agua recién preparada se muestra en la figura 9.



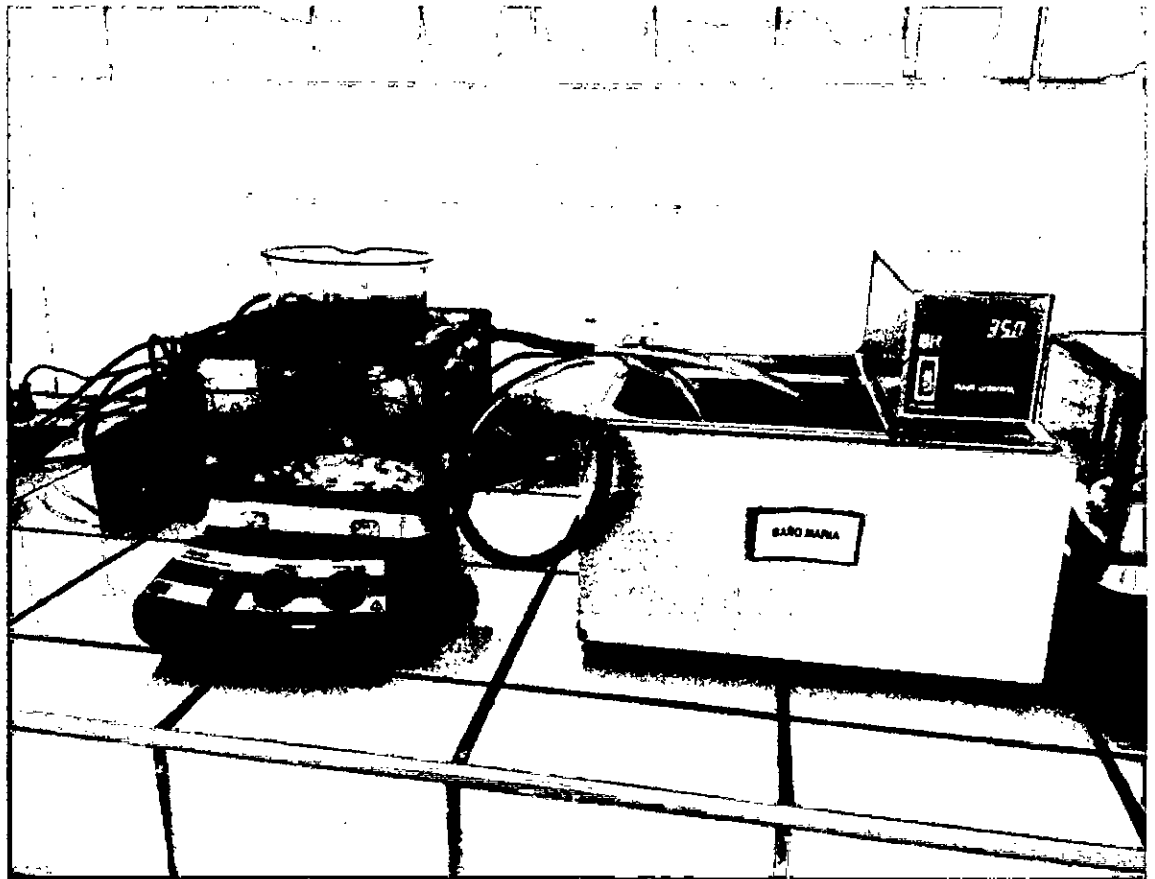
**Figura 9. Solución de Cromato de Potasio ( $K_2CrO_4$ ) a 22,5 mg  $Cr^{6+}/L$ .**

Fuente. Elaboración Propia.

Las pruebas se realizaron en tres reactores con muestras de 1 L de agua con Cromo (VI) como se muestra en las figuras 10 y 11.



**Figura 10. Reactores donde se realizaron las pruebas de tratamiento de agua con Cromo (VI). Fuente. Elaboración Propia**



**Figura 11. Sistema reactivo mostrando al aluminio en suspensión por agitación. Fuente. Elaboración Propia**

Resultados de las 18 pruebas realizadas a la tabla 4 empleando como chatarra de aluminio latas de gaseosa se muestran en la tabla 9.



Tabla 9

*Resultados diseño experimental prueba chatarra de aluminio latas de gaseosa*

Nro Prueba	vel agit	conc trat HCl	pH	tiempo rx	temp	masa Al	conc Cr6	% de reduc
1	600	1,5	3,5	30	25	5	21,5	4,4
2	800	1	3,5	60	35	3	19,5	13,3
3	1000	0,5	3,5	90	45	1	20	11,1
4	600	0,5	5	90	35	1	21,5	4,4
5	1000	1,5	2	30	35	5	20,5	8,9
6	800	0,5	2	30	25	1	17,5	22,2
7	600	0,5	5	30	45	5	20,5	8,9
8	800	1,5	5	90	45	5	20,5	8,9
9	1000	1,5	2	90	25	1	21	6,7
10	800	1	3,5	60	35	3	18	20
11	1000	0,5	2	60	45	5	18,5	17,8
12	600	0,5	2	90	25	5	18	20
13	1000	0,5	5	30	25	3	17,5	21,2
14	600	1,5	2	90	45	3	19	15,6
15	1000	1,5	5	30	45	1	20,5	8,9
16	600	1,5	5	60	25	1	19	15,6
17	600	1	2	30	45	1	20,5	8,9
18	1000	1	5	90	25	5	16	28,9

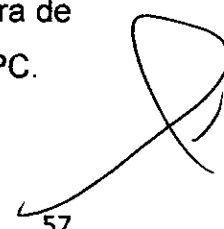
Concentración inicial de Cromo (VI) antes de tratamiento 22,5 mg/L.

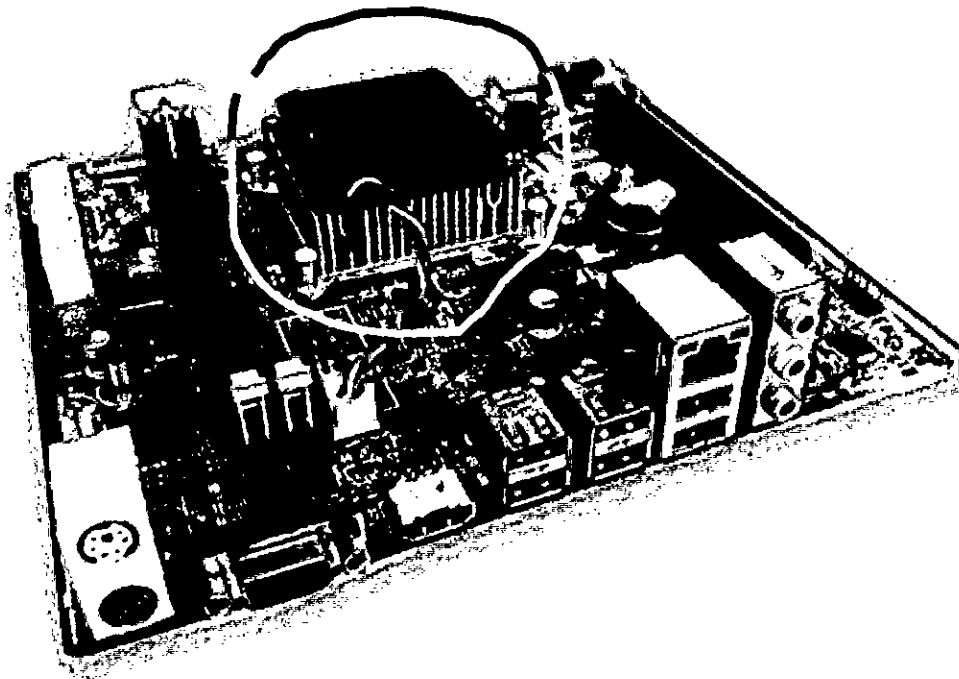
Se utilizó  $K_2CrO_4$  como fuente de Cromo.

Fuente. Elaboración Propia

**5.1.3. Resultados diseño experimental para chatarra de aluminio de refrigerante de placa base de PC**

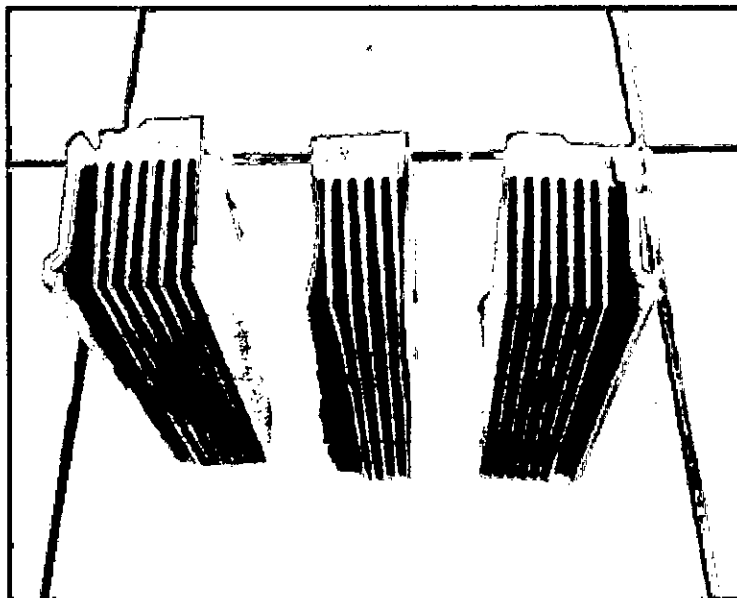
Se investigó la capacidad de reducción de Cr(VI) por parte de chatarra de aluminio que tiene como origen el refrigerante de la placa base de la PC.





**Figura 12. Placa base mostrando el refrigerante hecho de aluminio. Fuente: Elaboración Propia**

El refrigerante fue cortado en tres partes como se muestra en la figura 13.



**Figura 13. Refrigerante cortado en tres partes. Fuente Elaboración Propia**

Para el retiro y limpiado de capas de óxido se dejaron estas partes en reposo en contacto con  $H_2SO_4$  1 N por 15 minutos.

Las pruebas se realizaron en tres reactores con muestras de 1 L de agua con Cromo (VI) como se muestra en las figuras 14.



**Figura 14. Reactores donde se realizaron las pruebas de tratamiento de agua con Cromo (VI) con chatarra de refrigerante. Fuente. Elaboración Propia.**

En la figura 15 se muestra más detalle del reactor con el aluminio incorporado.





**Figura 15. Reactor en operación con aluminio de refrigerante de PC en contacto con la solución de cromo y agitación magnética.**

Fuente: Elaboración Propia

Resultados de las 18 pruebas realizadas a la tabla 6 empleando como chatarra de aluminio refrigerante de placa base de PC se muestran en la tabla 10.

Tabla 10

*Resultados diseño experimental prueba chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC.*

Nro Prueba	Bloque	temp	pH	tiempo rx	conc Cr6	%Red
1	1	30	4	80	29,34	12,42
2	1	40	2	80	18,86	43,7
3	1	20	6	80	27,2	18,81
4	1	40	6	40	23,05	31,19
5	1	30	6	120	27,08	19,16
6	1	40	6	40	23,05	31,19
7	1	20	2	120	14,67	56,21
8	1	30	2	40	26,35	21,34
9	1	20	2	120	12,57	59,34
10	2	40	4	120	27,2	18,81
11	2	20	6	120	23,05	31,19
12	2	40	2	120	27,8	17,01
13	2	20	4	40	25,15	24,93
14	2	20	2	40	18,86	43,7
15	2	30	4	80	30,74	8,24
16	2	20	6	40	30,74	8,24
17	2	40	6	120	32,2	3,88
18	2	40	2	40	24,88	25,73

Concentración inicial de Cromo (VI) antes de tratamiento 33,5 mg/L.

Se utilizó  $K_2CrO_4$  como fuente de Cromo.

Fuente: Elaboración Propia.

## 5.2. Resultados Inferenciales

Análisis inferencial sólo se realizó a los resultados (datos tabla 10) obtenidos con la chatarra teniendo como fuente al refrigerante ya que dio mejores resultados en cuanto a porcentaje de reducción de Cr(VI) a Cr(III) respecto a la chatarra de latas de bebidas.

Análisis estadístico de datos de la tabla 10 con software JMP v11, dieron como resultado lo siguiente:

Tabla 11

*Resumen del ajuste datos chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC*

R cuadrado	0,978427
R cuadrado ajustado	0,938878
Raíz del error cuadrático medio	1,348023
Media Respuesta	24,59944
Observaciones (o suma de pesos)	18

Fuente. Elaboración Propia

Tabla 12

*Análisis de varianza datos chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC*

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Razón F
Modelo	11	494,5061	44,9551	24,7391
Error	6	10,90299	1,8172	<b>Prob&gt;F</b>
C. Total	17	505,4091		<0,0004

Fuente. Elaboración propia

Tabla 13

*Falta de ajuste datos chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC*

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Razón F
Falta de ajuste	4	8,697994	2,17450	1,9723
Error puro	2	2,205000	1,10250	<b>Prob&gt;F</b>
Error total	6	10,902994		0,3636
				<b>R cuadrado máximo</b>
				0,9956

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 14

Estimación de parámetros datos chatarra de aluminio refrigerante  
placa base de PC

Término	Estimación	Error estándar	Razón t	Prob> t
Constante del Modelo	29,452224	0,765753	38,46	<0,0001
Bloque[1]	-1,662271	0,437037	-3,80	0,0089
temp(20,40)	1,2216667	0,492869	2,48	0,0479
pH(2,6)	3,5766667	0,42032	8,51	0,0001
Tiempo rx(40,120)	-2,086667	0,492869	-4,23	0,0055
Bloque[1]xtemp	-2,308333	0,492869	-4,68	0,0034
tempxtemp	-6,239308	0,895788	-6,97	0,0004
Bloque[1]xpH	-0,493333	0,42032	-1,17	0,2850
tempxpH	-1,519654	0,406796	-3,74	0,0097
Bloque[1]xtiempo rx	-0,631667	0,492869	-1,28	0,2473
temp x tiempo rx	2,1097454	0,472529	4,46	0,0043
pH x tiempo rx	-0,487208	0,450376	-1,08	0,3209

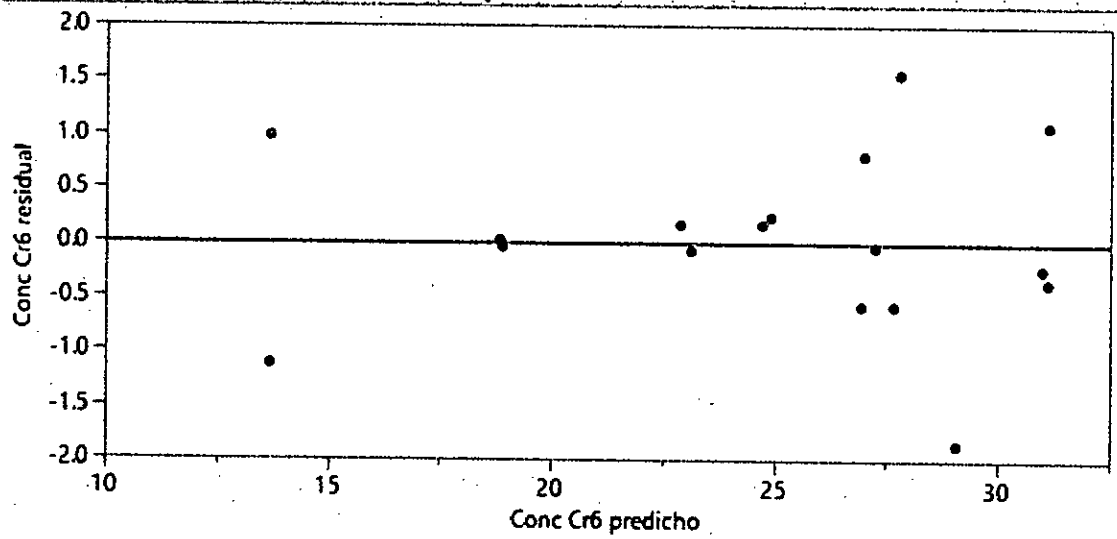
Fuente: Elaboración Propia.

**Resumen de efectos**

Fuente	Log Utilidad	Valor p
pH(2,6)	3.841	0.00014
temp*temp	3.361	0.00044
Bloque*temp	2.471	0.00338
temp*tiempo rx	2.370	0.00426
tiempo rx(40,120)	2.261	0.00548 ^
Bloque	2.049	0.00893 ^
temp*pH	2.014	0.00967
temp(20,40)	1.320	0.04789 ^
Bloque*tiempo rx	0.607	0.24728
Bloque*pH	0.545	0.28499
pH*tiempo rx	0.494	0.32090

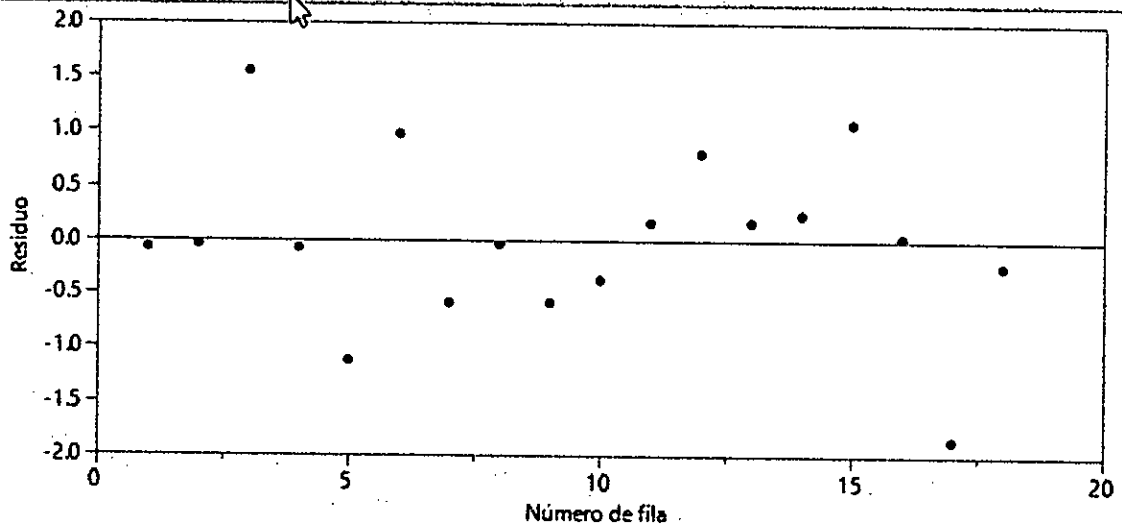
Figura 16. Resumen de efectos datos chatarra de aluminio refrigerante  
placa base de PC. Fuente: JMP v11

**Gráfico de residuos frente a valores predichos**



**Figura 17. Gráfico de residuos frente a valores predichos para datos chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC. Fuente: JMP v11**

**Gráfico de residuos frente a las filas**



**Figura 18. Gráfico de residuos frente a las filas para datos chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC. Fuente: JMP v11**

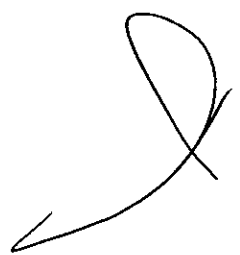


**Expresión de predicción**

29.452239235

$$\begin{aligned}
 & + \text{Match}(\text{Block}) \begin{pmatrix} \text{"1"} \Rightarrow -1.662270535 \\ \text{"2"} \Rightarrow 1.6622705355 \\ \text{else} \Rightarrow 0 \end{pmatrix} \\
 & + 1.2216666667 \cdot \left( \frac{(\text{temp}-30)}{10} \right) \\
 & + 3.5766666667 \cdot \left( \frac{(\text{pH}-4)}{2} \right) \\
 & + -2.0866666667 \cdot \left( \frac{(\text{tiempo rx}-80)}{40} \right) \\
 & + \text{Match}(\text{Block}) \begin{pmatrix} \text{"1"} \Rightarrow \left( \frac{(\text{temp}-30)}{10} \right) \cdot -2.3083333333 \\ \text{"2"} \Rightarrow \left( \frac{(\text{temp}-30)}{10} \right) \cdot 2.3083333333 \\ \text{else} \Rightarrow 0 \end{pmatrix} \\
 & + \left( \frac{(\text{temp}-30)}{10} \right) \cdot \left( \left( \frac{(\text{temp}-30)}{10} \right) \cdot -6.239307588 \right) \\
 & + \text{Match}(\text{Block}) \begin{pmatrix} \text{"1"} \Rightarrow \left( \frac{(\text{pH}-4)}{2} \right) \cdot -0.4933333333 \\ \text{"2"} \Rightarrow \left( \frac{(\text{pH}-4)}{2} \right) \cdot 0.4933333333 \\ \text{else} \Rightarrow 0 \end{pmatrix} \\
 & + \left( \frac{(\text{temp}-30)}{10} \right) \cdot \left( \left( \frac{(\text{pH}-4)}{2} \right) \cdot -1.519653583 \right) \\
 & + \text{Match}(\text{Block}) \begin{pmatrix} \text{"1"} \Rightarrow \left( \frac{(\text{tiempo rx}-80)}{40} \right) \cdot -0.6316666667 \\ \text{"2"} \Rightarrow \left( \frac{(\text{tiempo rx}-80)}{40} \right) \cdot 0.6316666667 \\ \text{else} \Rightarrow 0 \end{pmatrix} \\
 & + \left( \frac{(\text{temp}-30)}{10} \right) \cdot \left( \left( \frac{(\text{tiempo rx}-80)}{40} \right) \cdot 2.1097453684 \right) \\
 & + \left( \frac{(\text{pH}-4)}{2} \right) \cdot \left( \left( \frac{(\text{tiempo rx}-80)}{40} \right) \cdot -0.487207935 \right)
 \end{aligned}$$

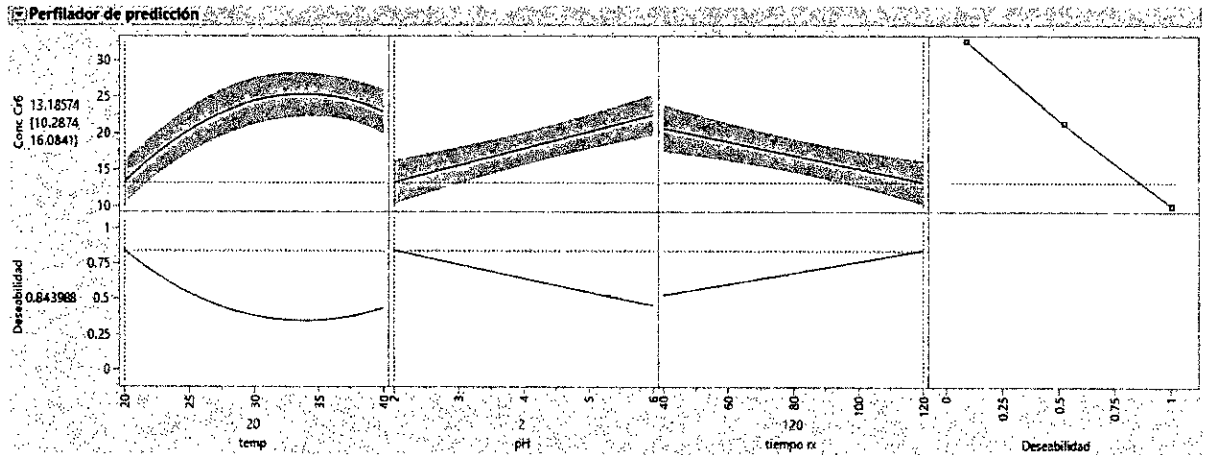
**Figura 19. Expresión de predicción para datos chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC. Fuente: JMP v11**



	Bloque	temp	pH	tiempo rx	Conc Cr6	Fórmula pred. Conc Cr6
1	1	40	6	40	23.05	23.123470096
2	1	40	2	80	18.86	18.900314694
3	1	30	4	80	29.34	27.7899687
4	1	40	6	40	23.05	23.123470096
5	1	20	2	120	12.57	13.693470096
6	1	20	2	120	14.67	13.693470096
7	1	30	2	40	26.35	26.937760765
8	1	20	6	80	27.2	27.240314694
9	1	30	6	120	27.08	27.667760765
10	2	30	4	80	30.74	31.114509771
11	2	40	2	40	24.88	24.712902462
12	2	40	2	120	27.8	26.996809069
13	2	20	6	120	23.05	22.882902462
14	2	20	4	40	25.15	24.909947551
15	2	40	6	120	32.2	31.123086033
16	2	20	2	40	18.86	18.833086033
17	2	40	4	120	27.2	29.059947551
18	2	20	6	40	30.74	30.986809069

**Figura 20. Captura de los valores experimentales y el predicho por el modelo dado en la figura 19 para las 18 pruebas experimentales de datos de chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC. Para comparación ver últimas dos columnas.**

Fuente: JMP v11



**Figura 21. Captura del Gráfico de Optimización del perfilador de predicción para datos chatarra de aluminio refrigerante placa base de PC, mostrando los valores óptimos para mayor reducción de Cr(VI). Fuente: JMP v11**

## **VI. Discusión de resultados**

Se ha probado el empleo de chatarra de aluminio proveniente de latas de bebidas y del refrigerante de las placas de PCs. Debido a que las latas de aluminio no fueron pulidas externamente y fueron utilizados como estaban, sólo eliminando la capa de óxido de la parte interna dieron resultados no muy buenos, consiguiéndose en el mejor de los casos sólo una reducción de 28,9 % de Cr(VI).

Mejores resultados se obtuvieron empleando el refrigerante de placas de PC con reducciones de 59,3 %.

### **6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados**

Como hipótesis principal se planteó conseguir una reducción de la concentración de cromo hexavalente en agua de 60 % mediante el uso de chatarra de aluminio cero-valente,

De las pruebas realizadas, se puede comprobar que empleando como chatarra de Aluminio refrigerante de PCs da mejor resultados ya que ofrece alta área superficial para la reacción de oxidación- reducción debido a que posee aletas. Se ha conseguido reducciones del 59,3 % (ver última columna tabla 10). Si bien los resultados están cercanos a lo planteado como hipótesis se podría concluir que el método no es muy eficiente y podría ser usado como una etapa preliminar de tratamiento, antes de usar otro método adicional que permita una remoción mayor de Cromo

De la figura 16, se puede observar que las variables que tienen los efectos más importantes en el tratamiento son el pH, el término cuadrático de la temperatura, la interacción de temperatura-tiempo de reacción, el tiempo de reacción y la interacción temperatura-pH en ese orden de importancia. Respecto a lo planteado en la primera hipótesis secundaria

no sólo el pH y la temperatura son importantes, se ha probado que también es necesario considerar otras variables como el tiempo de reacción y términos adicionales como los cuadráticos (respecto al tiempo) e interacciones (temperatura-tiempo, temperatura-pH) para explicar mejor el proceso.

Condiciones para conseguir el mejor tratamiento implica obtener un buen modelo de predicción a partir de los datos experimentales y chequear su adecuación para que pueda ser empleado para propósitos predictivos de confiabilidad y exactitud. Para ello de los resultados estadísticos obtenidos a los datos se puede decir que el modelo es adecuado por lo siguiente:

- a. Al evaluar el test de significancia global se utilizó dos indicadores:  $R^2$  y  $R_{adj}^2$ . De la tabla 11 se puede concluir que el modelo cuadrático es adecuado para describir la relación entre la variable respuesta Concentración de Cr(VI) y las variables regresoras ya que el coeficiente de determinación  $R^2=0,97843$  y el  $R_{adj}^2=0,93888$  tienen valores próximos y muy cercanos a la unidad, significando que el modelo para la respuesta evaluada, a un nivel de confianza del 95%, puede explicar el 93,9 % del proceso de tratamiento con aluminio.
- b. Del análisis de varianza para el modelo, en general valores grandes de  $F$  y valores pequeños de  $p$  ( $<0,005$ ) indican que el modelo es significativo para describir el proceso. De los resultados de la tabla 12, se tiene un valor de  $F=24,7321$  y un valor de  $p<0,0004$ , concluyendo que el modelo es significativo en describir la respuesta.
- c. Un valor pequeño de  $p$  ( $<0,05$ ) indica una falta significativa de ajuste. En la tabla 13 de Falta de ajuste, el valor  $Prob>F$  es el valor

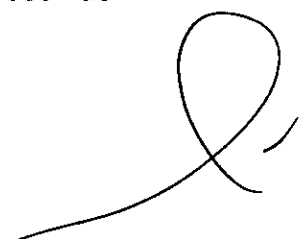
$p$  para la prueba falta de ajuste. Del valor de  $p$  igual a 0,3636, se puede concluir que no existe falta de ajuste al modelo cuadrático propuesto, esto es no se rechaza la hipótesis nula de que no hay falta de ajuste.

En la tabla 14, columna de estimación se puede observar que existe una relación entre la variable respuesta concentración de Cr(VI) y las variables regresoras, ya que el valor de estimación de los coeficientes de las variables regresoras es diferente de cero. También en la columna valor  $p$  se muestra valores  $<0,005$  que indica que los términos son significativos e importantes para ser utilizados en el modelo de ajuste. Términos de menor importancia que no pueden ser considerados en el modelo debido a que no son significativos ya que tienen valores de  $p > 0,05$  son: Bloque[1]xpH, Bloque[1]xtiempo rx y pH x tiempo rx.

- d. En las figuras 17 y 18 se observa el gráfico de residuos frente a valores previstos y frente a filas, que tiene un comportamiento normal, es decir, puntos aleatoriamente distribuidos, sin presencia de outliers o puntos extraños con valores de Concentración de Cr(VI) residuales muy elevados que afectarían la capacidad predictora del modelo.

Del análisis estadístico, se puede confiar en la capacidad predictora del modelo como queda confirmado en la figura 20, al comparar las dos últimas columnas de valores de concentración de Cr(VI) experimentales y las calculadas por el modelo de predicción, estando los valores muy cercanos.

Ahora que se tiene seguridad y confiabilidad en el modelo predictivo dado por la ecuación en la figura 19, se puede realizar el proceso de optimización del tratamiento del agua conteniendo Cr(VI).



Empleando la herramienta perfilador de optimización, se concluye que los valores óptimos para conseguir la mayor reducción de Cr(VI) se da bajo las siguientes condiciones (ver figura 21):

Temperatura = 20 °C

pH = 2

Tiempo de tratamiento = 120 min

Concentración de Cr(VI) luego del tratamiento = 13,2 mg/L, con un porcentaje de reducción de 60,6 %

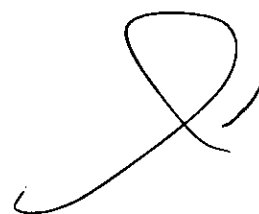
Deseabilidad= 0,844

## **6.2. Contratación de los resultados con otros estudios similares**

Treviño P. (Treviño et al 2014) realiza experimentos y muestra que el primer paso en la reacción de reducción es la eliminación de la película de óxido. Propone que la cinética de reducción de Cr (VI) en medios ácidos por Al se rige por la temperatura, el área de superficie y la transferencia de masa. La mayor velocidad de reacción se obtuvo cuando una solución de 40 ppm de Cr (VI) se redujo a 50 °C con una espuma de Al de 40 ppi pretratada en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1,0 N con reducciones mayores al 90 %. Comparado a este trabajo en nuestra investigación se consigue menores reducciones (59 a 60 %). La clave para un mayor rendimiento es que usan un material de alta área superficial como es la espuma de aluminio.

## **6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes**

Como autor de la investigación me responsabilizo de toda la información emitida en esta investigación.



## VII. CONCLUSIONES

De las pruebas realizadas, se puede comprobar que empleando como chatarra de Aluminio refrigerante de PCs da mejor resultados para la reacción de oxidación- reducción. Se ha conseguido reducciones del 59,3 %. Se puede concluir que el método no es muy eficiente y podría ser usado como una etapa preliminar de tratamiento, antes de usar otro método adicional que permita una remoción mayor de Cromo

Variables que tienen los efectos más importantes en el tratamiento son el pH, el término cuadrático de la temperatura, la interacción de temperatura-tiempo de reacción, el tiempo de reacción y la interacción temperatura-pH en ese orden de importancia.

Empleando la herramienta perfilador de optimización, se concluye que los valores óptimos para conseguir la mayor reducción de Cr(VI) se da bajo las siguientes condiciones:

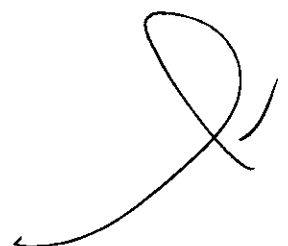
Temperatura = 20 °C

pH = 2

Tiempo de tratamiento = 120 min

Concentración de Cr(VI) luego del tratamiento = 13,2 mg/L, con un porcentaje de reducción de 59 a 60 %

Deseabilidad= 0,844





## VIII. RECOMENDACIONES

- Para lograr mayor eficiencia en la reducción de Cr(VI), para estudios posteriores se recomienda emplear aluminio que ofrezca mayor área de superficie para la reacción, por ejemplo esponja de aluminio.
- Para estudios posteriores, tener mucho cuidado en lo que respecta al almacenamiento de los kits de aluminio, ya que el reactivo al ser de naturaleza higroscópica, se deteriora con la humedad y el paso del tiempo.
- Se recomienda realizar estudios adicionales con otros metales como el Hierro cero-valente.



## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

**Application Note UV-0004.** Quantitative Determination of Chromium by Diphenylcarbazide Method. Jasco. Descargado de <https://jascoinc.com/wp-content/uploads/2017/09/APP-Note-UV0004-Chromium-Quantitative-Determination.pdf>

**ASTM D 857-02.** Standard Test Method for aluminium in water. ASTM international.

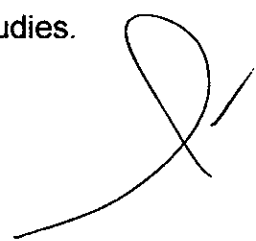
**Bradley Jones y J. Nachtsheim. (2011).** A class of three-level designs for Definitive Screening in the presence of second-order effects. Journal of Quality Technology. Vol. 43, No 1, January 2011.

**Bradley Jones y J. Nachtsheim. (2013).** Definitive Screen Designs with Added Two-Level Categorical Factors. Journal of Quality Technology. Vol. 45, No 2, April 2013.

**DOC316.53.01033.** Chromium, Hexavalent. Method 8023 (hexavalent). Recuperado de <http://www.d.umn.edu/~dlong/Envengrinfo/Instruction-Chromium-TNT854.pdf>

**Gheju M. y Pode R. (2010).** Removal of Hexavalent Chromium from Wastewater by use of scrap Iron. World Academy of Science. Engineering and Technology.

**Gunatilake (2015).** Methods of removing Heavy metals from industrial wastewater. Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies. Vol. 1, November.



**Gutiérrez Pulido, De la Vara Salazar (2012).** Análisis y diseño de experimentos. 3ed. Mc Graw Hill.

**Jiang et al (2017).** Dramatically enhanced aerobic Cr(VI) reduction with scrap zero-valent aluminium induced by oxalate. Chemical Engineering Journal 308. 588-596.

**Khatri et al (2018).** Advanced oxidation processes based on zero-valent aluminium for treating textile wastewater. Chemical Engineering Journal 348. 67-73.

**Lin et al (2009).** Chromate reduction by zero-valent Al metal as catalyzed by polyoxometalate. Water research 43 (2009) 5015 – 5022.

**Nidheesh et al (2018).** Review of zero-valent aluminium based water and wastewater treatment methods. Chemosphere, doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.02.155.

**Onchoque K y Sasu S. (2016).** Determination of Hexavalent Chromium (Cr(VI)) Concentrations via Ion Chromatography and UV-Vis Spectrophotometry in Samples Collected from Nacogdoches Wastewater Treatment Plant, East Texas (USA). Hindawi Publishing Corporation Advances in Environmental Chemistry. Volume 2016, Article ID 3468635.

**Perkin Elmer. Determination of Hexavalent Chromium in toys by using UV/Vis Spectrometry.** Recuperado de [https://www.perkinelmer.com.cn/pdfs/downloads/APP\\_Determination\\_ofHexavalentChromium.pdf](https://www.perkinelmer.com.cn/pdfs/downloads/APP_Determination_ofHexavalentChromium.pdf)

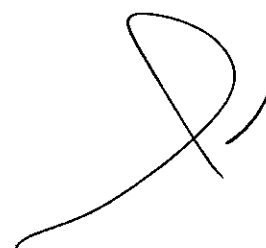
**Siriangkhawut et al. (2013).** Quantitation of Aluminium Content in Waters and Soft Drinks by Spectrophotometry Using Eriochrome Cyanine R. Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. Volume 4 Issue 3, July - September 2013.

**Standard Methods for the examination of Water and Wastewater.** Method 3500-Cr, American Public Health Association. 18 th Edition 1992.

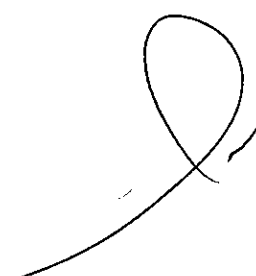
**Treviño et al (2014).** Chromium (VI) reduction kinetics by zero-valent Aluminium. International Journal of Electrochemical Science, 9 (2014) 2556-2564.

**Tria et al. (2007).** Determination of aluminium in natural wáter samples. Analytica Chimica Acta 588 (2007). 153-165.

**Yang et al (2017).** Zero-valent aluminum for reductive removal of aqueous pollutants over a wide pH range: Performance and mechanism especially at near-neutral pH. Water Research (2017), doi: 10.1016/j.watres.2017.07.013.

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized letter 'D' with a horizontal line extending to the left and a vertical line extending downwards from the bottom of the 'D'.

**ANEXOS**

A handwritten mark or signature consisting of a long, sweeping curve that loops back to cross itself, ending in a small tick mark.

MATRIZ DE CONSISTENCIA

Título: "REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN AGUA MEDIANTE EL USO DE CHATARRA DE ALUMINIO CERO-VALENTE"

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variable	Dimensiones	Indicadores	Método de determinación
<p><b>General</b></p> <p>¿Cómo el uso de chatarra de aluminio cero-valente reduce la concentración de cromo hexavalente en agua?</p> <p><b>Específicos</b></p> <p>¿Cuáles son las variables que afectan la reducción de la concentración de cromo hexavalente en agua mediante el uso de chatarra de aluminio cero-valente?</p> <p>¿Cuáles son las condiciones para obtener la mayor reducción de la concentración de Cr(VI) en agua mediante el uso de chatarra de aluminio cero-valente?</p>	<p><b>General</b></p> <p>Reducir la concentración de cromo hexavalente en agua mediante el uso de chatarra de aluminio cero-valente</p> <p><b>Específicos</b></p> <p>Determinar las variables que afectan la reducción de la concentración de cromo hexavalente en agua mediante el uso de chatarra de aluminio cero-valente.</p> <p>Determinar las condiciones en las cuales se obtiene la mayor reducción de la concentración de Cr(VI) en agua mediante el uso de chatarra de aluminio cero-valente.</p>	<p><b>General</b></p> <p>La reducción de la concentración de cromo hexavalente en agua es de 60 % mediante el uso de chatarra de aluminio cero-valente</p> <p><b>Específicos</b></p> <p>Las variables que afectan la reducción de la concentración de cromo hexavalente en agua mediante el uso de chatarra de aluminio cero-valente son pH de solución y la temperatura.</p> <p>Las condiciones en las cuales se obtiene la mayor reducción de Cr(VI) en agua mediante el uso de chatarra de aluminio cero-valente es a pH bajo, temperatura alta y tratamiento por 60 minutos.</p>	<p><b>Variable Dependiente:</b></p> <p>Concentración de Cr(VI) en el agua luego del tratamiento con aluminio cero Valente</p> <p><b>Variable independiente:</b></p> <p>Uso de aluminio cero valente</p>	<p>pH de solución</p> <p>Temperatura</p> <p>Pretratamiento de aluminio cero Valente</p> <p>Cantidad de aluminio cero Valente</p> <p>Tiempo de tratamiento</p> <p>Velocidad de agitación</p>	<p>Determinación en ppm</p> <p>-log[H<sup>+</sup>]</p> <p>°C</p> <p>min</p> <p>g</p> <p>min</p> <p>rpm</p>	<p>Espectrofotométrico.</p> <p>Con medidas de longitud de onda a 540 nm</p> <p>Potenciometro</p> <p>Termómetro</p> <p>Tiempo de inmersión de aluminio cero Valente en solución de HCl 0,5, 1y 1,5 N por una hora.</p> <p>Balanza Analítica</p> <p>Reloj o Cronómetro</p> <p>Agitador magnético</p>

Fuente: Elaboración Propia