



# INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

---

## ANÁLISIS DE ADSORCIÓN DE $\text{Cr}^{+6}$ POR PARTÍCULAS A BASE DE CÁSCARA DE *Oecopetalum mexicanum*

### TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO AMBIENTAL

P R E S E N T A

NERI LIZVET SOTO ZAVALA

Director

M.C. ALAN ANTONIO RICO BARRAGÁN

Codirector

M.B. GUADALUPE CORELLY SALAZAR  
SALAZAR

MISANTLA, VERACRUZ

JULIO, 2019

# FORMATO DE IMPRESIÓN



**INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

FECHA: 04 de Julio de 2019.

ASUNTO: **AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN  
DE TESIS PROFESIONAL.**

**A QUIEN CORRESPONDA:**

Por medio de la presente hago constar que el (la) C:

**NERI LIZVET SOTO ZAVALETA**

---

pasante de la carrera de INGENIERÍA AMBIENTAL con No. de Control 142T0423 ha cumplido satisfactoriamente con lo estipulado por el **Manual de Procedimientos para la Obtención del Título Profesional de Licenciatura** bajo la opción Titulación Integral (Tesis Profesional)

Por tal motivo se **Autoriza** la impresión del **Tema titulado:**

**“ANÁLISIS DE ADSORCIÓN DE Cr<sup>+6</sup> POR PARTÍCULAS A BASE DE  
CÁSCARA DE *Oecopetalum mexicanum*”**

Dándose un plazo no mayor de un mes de la expedición de la presente a la solicitud del Acto de Recepción para la obtención del Título Profesional.

ATENTAMENTE

**ING. GERBACIO TLAXALO ESPINOZA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES**



Archivo.

VER. 01/03/09

F-SA--39

La tesis titulada: **ANÁLISIS DE ADSORCIÓN DE Cr<sup>+6</sup> POR PARTÍCULAS A BASE DE CÁSCARA DE *Oecopetalum mexicanum***

Fue realizada por **NERI LIZVET SOTO ZAVALA** bajo la dirección del Comité Particular indicado, ha sido aprobada y aceptada por el mismo como requisito parcial para obtener el grado de:

## **INGENIERO AMBIENTAL**

Comité particular

Director de tesis:	M.C. Alan Antonio Rico Barragán
Codirector tesis:	M.B. Guadalupe Corelly Salazar Salazar
Asesor:	M.Sc. Elizabeth Salazar Hernández

## AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

Le gratifico y brindo este logro principalmente a **Dios** por haberme dado la oportunidad de culminar esta etapa de mi vida, al llenarme de bendiciones este camino, de paciencia y sabiduría.

Infinitamente gracias a mis padres **Leonor** y **Juan** quienes confiaron y me apoyaron en todo momento, este logro es por ellos y para ellos. Gracias por creer en mí, por su motivación, por aquellos consejos, por nunca desistir en aquellos momentos difíciles para usted, por cada una de sus enseñanzas y sobre todo les agradezco por su infinito amor. Los amo

Del mismo modo les agradezco y dedico este logro a mis Hermanos **Rut** y **David** quienes fueron piezas claves para culminar esta etapa con sus buenos y malos ratos. Los amo.

También quiero dedicarle este logro a toda **mi Familia** que siempre estuvo pendiente de mí brindarme palabras de aliento cuando las necesitaba.

Al **Instituto Tecnológico Superior de Misantla**, por abrirme las puertas para formarme profesionalmente y por haber sido mi segunda casa.

Una de las personas a la que le estaré eternamente agradecida es a mi Director de tesis el **M.C. Alan Antonio Rico Barragán** por haberme permitido trabajar con usted y brindarme su apoyo en todo momento para la realización de este trabajo, gracias por sus conocimientos, experiencias, comprensión, por esa motivación cuando ya estaba agotada y no quería saber nada, esos regaños que fueron pocos, pero sobre todo la confianza que me brindo.

Le agradezco al jefe de carrera el **M.I. Daniel Aguayo Siqueiros** que estuvo pendiente de cada uno de mis pasos a lo largo de mi formación académica, brindando sus conocimientos, experiencia y motivación.

También quiero agradecerles a mis **Compañero** de clase, quienes me apoyaron en todo momento y me brindaron su confianza, muchas gracias por todos los acontecimientos que vivimos como grupo, siempre los recordare.

Gracias a la **M.B. Guadalupe Corelly Salazar Salazar** por haber sido la codirectora de tesis y a la **M.Sc. Elizabeth Salazar Hernández** por ser mi asesora

A **mis Maestros** les agradezco eternamente sus enseñanzas, conocimientos y experiencias compartidas a lo largo de mi trayectoria académica. Por haber sido pilares clave para mi formación profesional. Recordare cada una de las aventuras vividas dentro y fuera de las aulas.

## CONTENIDO

	Página
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b>	vii
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	viii
<b>RESUMEN</b>	ix
<b>SUMMARY</b>	x
<b>CAPÍTULO I. GENERALIDADES</b>	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Justificación	4
1.4 Objetivo	6
1.4.1 Objetivos Específicos	6
1.5 Hipótesis	6
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</b>	7
2.1 Contaminación	7
2.1.1 Contaminación del agua	7
2.1.2 Contaminación por metales pesados	10
2.1.3 Contaminación por Cr <sup>+6</sup>	11
2.1.4 Contaminación de Cr <sup>+6</sup> en México	12
2.2 Riesgo Ambiental	15
2.2.1 Toxicología ambiental	16
2.3 Remoción del Cr <sup>+6</sup>	22
2.3.1 Adsorción de Cr <sup>+6</sup> por adsorbentes orgánicos	24
2.4 Valores Límite	24
<b>CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	26
3.1 Tratamiento de la Cáscara de Cachichín	26
3.1.1 Molienda, tamizado e hidrólisis	28
3.2 Experimentación	30
3.3 Determinación de Adsorción	32
3.4 Análisis Estadístico	32
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	34
4.1 Pretratamiento del Adsorbente	34

	Página
4.1.1 Preparación del biomaterial	34
4.1.2 Caracterización del biomaterial	34
4.1.3 Hidrólisis alcalina	35
4.2 Efecto del Tiempo en el Proceso de Concentración de Cr <sup>+6</sup>	36
4.3 Efecto del Tamaño de Partícula en el Proceso de Adsorción del Cr <sup>+6</sup>	37
4.4 Efecto de la Masa en el Proceso de Adsorción del Cr <sup>+6</sup>	39
4.5 Análisis Factorial del Bioadsorbente con Modificación Química	39
4.6 Comparación de Medias de la Prueba de Duncan	41
4.7 Adsorbente sin Modificación Química	42
4.7.1 Efecto del tiempo en el proceso de concentración de Cr <sup>+6</sup>	42
4.7.2 Efecto del tamaño de partícula en el proceso de adsorción del Cr <sup>+6</sup>	43
4.7.3 Efecto de la masa en el proceso de adsorción del Cr <sup>+6</sup>	44
4.8 Análisis Factorial del Bioadsorbente sin Modificación Química	45
4.9 Comparación de Medias de la Prueba de Duncan	46
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES</b>	<b>48</b>
<b>CAPÍTULO VI. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>49</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

		Página
Cuadro 1	Contaminantes, procesos y fuentes que afectan la calidad del agua	9
Cuadro 2	Usos comunes de los compuestos de Cr, Cr+3 y Cr+6	12
Cuadro 3	Valores límites de diferentes organizaciones	25
Cuadro 4	Variables utilizadas en el proceso de adsorción	31
Cuadro 5	Análisis Factorial utilizando adsorbente con modificación química	40
Cuadro 6	Prueba Post-Hoc Duncan en función de la variable de Tiempo de contacto	41
Cuadro 7	Análisis Factorial utilizando adsorbente sin modificación química	46
Cuadro 8	Prueba Post-Hoc Duncan en función de la variable de Tiempo de contacto	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página	
Figura 1	Cáscara de cachichín ( <i>Oecopetalum mexicanum</i> )	26
Figura 2	Pesado de la cáscara de cachichín	26
Figura 3	Vertido de la cáscara a un recipiente para su lavado	26
Figura 4	Cáscara en el recipiente de plástico	26
Figura 5	Vertido del etanol	27
Figura 6	Cáscara en reposo	27
Figura 7	Separación de la cáscara	27
Figura 8	Lavado de la cáscara	27
Figura 9	Segundo lavado	28
Figura 10	Acomodo de la cáscara en el deshidratador	28
Figura 11	Partículas de 0.595 mm	29
Figura 12	Partículas de 0.297 mm	29
Figura 13	Equipo Soxhlet	29
Figura 14	Curva de calibración	31
Figura 15	Agitador CIVEQ ARH-5	32
Figura 16	Cáscara de cachichín molida	34
Figura 17	Tamaños de partículas obtenidos después de ser tamizadas	35
Figura 18	<i>Oecopetalum mexicanum</i> modificado químicamente	35
Figura 19	Remoción de Cr <sup>+6</sup> en función del tiempo de contacto	36
Figura 20	Porcentaje de remoción del Cr <sup>+6</sup> con relación al tamaño de partícula	38
Figura 21	Comparación del porcentaje de remoción en relación a la masa	39
Figura 22	Remoción de Cr <sup>+6</sup> en función del tiempo de contacto	42
Figura 23	Porcentaje de remoción del Cr <sup>+6</sup> con relación al tamaño de partícula	44
Figura 24	Comparación del porcentaje de remoción en relación a la masa	45

## RESUMEN

El uso de metales y sustancias químicas en los procesos industriales, como fabricación de acero, curtido de cuero, el cromado, la preservación de madera, inhibidores de corrosión y la industria textil; han generado grandes cantidades de aguas residuales que rebasan los límites máximos permisibles establecidos en las normas. Uno de los elementos más comunes en estas aguas residuales es el  $\text{Cr}^{+6}$ , este metal presenta un gran impacto al ambiente y al ser humano, debido a las principales afectaciones que causa en las personas expuestas a las aguas contaminadas; llegando a ocasionar diversos daños, la Agencia Internacional de Investigación contra el Cáncer, por sus siglas en inglés "IARC" clasifica a dicho contaminante dentro del grupo A, es decir, que se tienen los suficientes estudios que demuestran los efectos de estar en contacto con este metal, provocando el aumento en la probabilidad de contraer cáncer pulmonar o leucemia. Para la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  en aguas se aplican diversas tecnologías, dentro de las cuales algunas generan residuos tóxicos o en su caso el costo del tratamiento es elevado, a causa de esto es necesario buscar nuevas formas de adsorber dicho contaminante. La tecnología a base de adsorbentes orgánicos ha ido tomando importancia con el paso de los años, debido a que son una opción económica y viable para facilitar el tratamiento de las aguas con presencia de metales pesados, en este caso se experimentó con la cáscara de cachichín (*Oecopetalum mexicanum*), el cual es un residuo que no suele ser aprovechable en ninguna otra actividad. En el presente trabajo se propone observar la capacidad de adsorción que presenta la cáscara de *Oecopetalum mexicanum* ante el  $\text{Cr}^{+6}$  con y sin modificación química. Se planteó un diseño experimental de adsorción; se evaluaron las variables de concentración de  $\text{Cr}^{+6}$  (10 y 25 ppm) tamaño de partícula (0.297 y 0.595 mm), masa del adsorbente (25 y 50 mg) y tiempo de contacto (1, 15, 30, 45 y 60 min), cada experimento se realizó por triplicado empleándose tubos de ensaye de 10 mL, agregando 5 mL de la solución de  $\text{Cr}^{+6}$ . La capacidad de adsorción se evaluó manteniendo el pH constante (<3), utilizando el procedimiento descrito por Ali *et al.* (2016). Los resultados obtenidos para los porcentajes de remoción en los análisis con modificación química fueron arriba de 60% mientras que aquellos sin modificación química estuvieron por encima del 70%, por lo tanto la remoción más eficiente ocurre utilizando la cáscara sin modificación química. Por lo tanto, la cáscara de cachichín (*Oecopetalum mexicanum*) puede ser considerada como una opción de bioadsorbente para la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$ .

Palabras claves: Remoción, Metales Pesados, *Oecopetalum mexicanum*

## SUMARY

The use of metals and chemicals in industrial processes, such as steel manufacturing, leather tanning, chrome plating, wood preservation, corrosion inhibitors and the textile industry; have generated large amounts of wastewater that exceed the permissible maximum limits set out in the standards. One of the most common elements in these wastewater is  $\text{Cr}^{+6}$ , this metal has a great impact on the environment and the human being, due to the main impacts it causes in people exposed to contaminated water; causing a variety of damage, the International Agency for Research against Cancer "IARC" classifies the pollutant within group A, that is, that sufficient studies are available to demonstrate the effects of being in contact with this metal, causing the increased likelihood of getting lung cancer or leukemia. For the removal of  $\text{Cr}^{+6}$  in water various technologies are applied, within which some generate toxic waste or where appropriate the cost of treatment is high, because of this it is necessary to look for new ways of adsorber said contaminant. The technology based on organic adsorbents has become important over the years, because they are an economical and viable option to facilitate the treatment of waters with the presence of heavy metals, in this case it was experimented with the shell of cachichin (*Oecopetalum mexicanum*), which is a residue that is not usually usable in any other activity. In this work it is proposed to observe the adsorption capacity presented by the shell of *Oecopetalum mexicanum* with  $\text{Cr}^{+6}$  with and without chemical modification. An experimental adsorption design was raised; concentration variables of  $\text{Cr}^{+6}$  (10 and 25 ppm) particle size (0.297 and 0.595 mm), adsorbent mass (25 and 50 mg) and contact time (1, 15, 30, 45 and 60 min) were evaluated, each experiment was performed by triplicate using 10 mL test tubes and , adding 5 mL of the  $\text{Cr}^{+6}$  solution. The adsorption capacity was evaluated by keeping the pH constant (<3), using the procedure described by Ali *et al.* (2016). The results obtained for removal percentages in chemically modified analyses were above 60% while those without chemical modification were above 70%, therefore the most efficient removal occurs using the shell without chemical modification. Therefore, the cachichin shell (*Oecopetalum mexicanum*) can be considered as a bioadsorbent option for the removal of  $\text{Cr}^{+6}$ .

Keywords: Removal, Heavy Metals, *Oecopetalum mexicanum*

## CAPÍTULO I. GENERALIDADES

### 1.1 Introducción

Dentro de los metales pesados, se encuentran el Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Estaño (Sn), Zinc (Zn) y el Cromo (Cr), este último se puede encontrar en dos estados de oxidación: hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) y trivalente ( $\text{Cr}^{+3}$ ).

El uso de metales y sustancias químicas en los procesos industriales, como la fabricación de acero, curtido de cuero, el cromado, preservación de madera, inhibidores de corrosión y la industria textil; han dado inicio a grandes cantidades de efluentes que contienen altos niveles de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

La presencia de metales pesados en los ecosistemas acuáticos causa severos daños a la vida de la flora y fauna, además de que eliminan microorganismos durante los tratamientos biológicos de aguas residuales y ocasiona que disminuya la eficiencia dentro del proceso de purificación.

Diversas sales metálicas son solubles en agua, como consecuencia no pueden ser separadas por tecnologías comunes (Hussein, 2004). Algunos de los métodos fisicoquímicos, tales como la precipitación y oxidación química, el tratamiento electroquímico, la filtración, el intercambio iónico y la tecnología a base de membranas han sido ampliamente utilizados para remover estos metales pesados de las aguas residuales de las industrias, sin embargo, estos procesos resultan inefectivos o caros (Hawley *et al.*, 2004).

Uno de los métodos más empleado es el proceso de adsorción, que en comparación con las anteriores técnicas, requiere un menor costo de inversión

económica y menor gasto en tiempo para la capacitación hacia el personal (Aretxaga *et al.*, 2001; Faull *et al.*, 2009).

La adsorción es considerada como un método efectivo en la separación de contaminantes de aguas residuales (Mayer, 2000), el uso de adsorbentes orgánicos ha tomado mucho auge, se tienen resultados de importantes niveles de adsorción; las cáscaras de yuca (Albis *et al.*, 2015), de arroz (Eggs *et al.*, 2012), banano maduro (Castro, 2014), mamey (Acosta *et al.*, 2012) nuez (Pineda *et al.*, 2011) y el amaranto (Rodríguez, *et al.*, 2017). Es por esta razón que en el presente trabajo se realizó un análisis, utilizando la cáscara del *Oecopetalum mexicanum* comúnmente llamado cachichín, como un adsorbente de Cromo Hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ )

## 1.2 Planteamiento del Problema

La contaminación del agua por la presencia de elementos metálicos genera impactos en el ambiente y en la salud de la población, actualmente existen diversas tecnologías que se encargan de adsorber estos metales, las cuales no son económicas.

Cabe mencionar que el Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los EUA, junto con la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) han determinado que al estar expuesto a los compuestos de  $\text{Cr}^{+6}$ , aumenta la probabilidad de contraer cáncer de pulmón y leucemia, además se tienen estudios donde tumores estomacales aparecen en personas que están en contacto con aguas potables con concentraciones que sobrepasan los límites máximos permisibles. La ingestión de agua con altas cantidades de  $\text{Cr}^{+6}$ , considerado como un elemento genotóxico y citotóxico para bacterias y organismos eucariontes, puede ocasionar problemas intestinales, enfermedades gástricas y hepáticas.

En México, existen reportes de la presencia de  $\text{Cr}^{+6}$  en ríos, lagos, cultivos, suelos y aire de zonas urbanas, así como en ambientes costeros y marinos, donde se ha detectado la acumulación de este metal tóxico en tejidos de peces y moluscos de consumo humano, este elemento se hace presente en varios ecosistemas a casusa de las industrias que lo usan en sus procesos, siendo una de las principales la industria curtidora, dado que el Cr es el protagonista en esta industria, por el uso de sales para procesar las pieles, es de esta manera como las curtidoras aportan a la contaminación por este metal.

Entre las técnicas de remoción convencionales de metales en solución, destaca el intercambio iónico o la precipitación química, las cuales son costosas o poco efectivas en presencia de bajas concentraciones del contaminante (Fu *et al.*, 2011).

### 1.3 Justificación

Dentro del Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2013-2018 se habla de la necesidad de asegurar agua suficiente y de calidad adecuada para garantizar el consumo humano, además de sanear las aguas residuales, teniendo en cuenta que el crecimiento económico del país sigue estrechamente vinculado a la emisión de contaminantes.

Desde los inicios de la revolución industrial y actualmente la contaminación del agua se ha visto afectada por varios contaminantes, principalmente por presencia de algunos metales pesados como Cd, Hg, Pb, Zn, Cr, entre otros. En este trabajo se le dio prioridad al  $\text{Cr}^{+6}$ , dado que es el sexto metal de transición más abundante en la naturaleza, así como también el más utilizado en los procesos industriales y por ende uno de los contaminantes más frecuentes encontrados en algunos cuerpos de agua, suelo y aire.

Se cuenta con adsorbentes químicos que se utilizan en la remoción de este contaminante, sin embargo, provocan residuos tóxicos o en su caso el costo del tratamiento es elevado, con lo cual es necesario buscar nuevas formas de adsorber dicho contaminante. En este caso se propone biosorción, que consiste en la captación pasiva de tóxicos por materiales biológicos o también llamados adsorbentes orgánicos, dicha alternativa es un procedimiento altamente competitivo y que va tomando fuerza en el ámbito de la investigación por su bajo costo para darle un tratamiento a las aguas con presencia de metales pesados.

En este caso se experimentó con la cáscara de cachichín (*Oecopetalum mexicanum*), esta proviene de una semilla comestible, la cual es cultivada por habitantes de la Sierra de Misantla, Veracruz, el cachichín pertenece a la familia Icacinaceae, se distribuye en los estados de Chiapas y Veracruz, mientras que en Sudamérica solo en Guatemala; dicha semilla es proporcionada por un árbol con el mismo nombre, este puede llegar a medir de 2 a 25 m de altura, la semilla es

café, reniforme, tiene medidas de 7 a 9 mm de largo por 7 mm de ancho, su radícula es de 1 mm de largo por 2 mm de ancho,(Lascurain, 2012; Gutiérrez, 1994). La cáscara es un residuo que no suele ser aprovechado para ninguna otra actividad productiva, dentro de las líneas de acción del PND destaca el buscar lograr un manejo integral de residuos sólidos, incluyendo su aprovechamiento de los materiales.

## 1.4 Objetivo General

- Evaluar la capacidad de adsorción que presentan las cáscaras de cachichín *Oecopetalum mexicanum* frente al  $\text{Cr}^{+6}$ .

### 1.4.1 Objetivos específicos

- Obtener y caracterizar partículas a partir de cáscara de *Oecopetalum mexicanum*.
- Determinar la remoción de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) en partículas de cáscara de *Oecopetalum mexicanum*.
- Aplicar un análisis de varianza ( $\alpha=0.05$ ) entre los tratamientos.

## 1.5 Hipótesis

- Las partículas a base de cáscara del *Oecopetalum mexicanum* pueden adsorber concentraciones de  $\text{Cr}^{+6}$ .

## **CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Contaminación**

La contaminación se puntualiza como la acción o incorporación al ambiente de sustancias o elementos que debido a su concentración o composición química, provocan un desequilibrio de los ciclos biogeoquímicos, los cuales son los responsables de establecer un equilibrio ambiental, originando efectos perjudiciales (EPA, 2015; Bermúdez, 2010).

Los contaminantes son emitidos por dos tipos de fuentes: naturales y antropogénicas, estas últimas se clasifican en fijas y móviles. Cuando los contaminantes han sido emitidos al ambiente, sufren una serie de reacciones, las cuales no solamente implican el transporte y dispersión, sino que también involucran reacciones químicas producidas por los contaminantes primarios, que después dan paso a los contaminantes secundarios los cuales inducen alteraciones en el equilibrio ecológico (Encinas, 2011).

Finalmente, los contaminantes alcanzan los receptores (flora, fauna y seres humanos) a través de varios mecanismos de transferencia, provocando numerosos efectos negativos (Encinas, 2011).

#### **2.1.1 Contaminación del agua**

El agua es el compuesto más abundante del planeta, cubriendo el 75% de la superficie total, aunque cabe mencionar que solo el 2.5% es agua dulce y el resto salada. Para ser más específicos menos, del 1% se encuentra en lagos, ríos y la atmósfera, mientras que el 30% se localiza en el subsuelo, dentro de los mantos freáticos y finalmente alrededor de un 70% es una gran masa sólida en forma de glaciares y casquetes polares (CONAGUA, 2011).

La contaminación del agua ocurre cuando existen sustancias químicas o de otra naturaleza en concentraciones superiores a las condiciones naturales, las cuales provocan alteraciones en las propiedades físicas, químicas y biológicas del agua debido a las descargas de sustancias líquidas, gaseosas o sólidas (WWAP, 2009; Bradford, 2015). A continuación, se muestran en el Cuadro 1 algunos de los contaminantes, procesos y fuentes que afectan a la calidad del agua.

Las fuentes de donde provienen los contaminantes pueden ser puntuales o móviles, las primeras descargan contaminantes en lugares específicos a través de tuberías y alcantarillas, por ejemplo: fábricas, minas, pozos petroleros. Las fuentes móviles o difusas abarcan grandes áreas de terreno, descargando contaminantes al agua sobre una región extensa, como por ejemplo vertimiento de sustancias químicas, tierras de cultivo, lotes para pastar ganado, construcciones y tanques sépticos (Echarri, 2006).

En México, la industria, la minería y la agricultura son de las principales actividades que dan origen a la mayoría de contaminantes del agua, en donde menos del 25% del agua residual recibe un tratamiento antes de ser vertida en ríos y lagos (CEMDA, 2006).

Cuadro 1. Contaminantes, procesos y fuentes que afectan la calidad del agua

Contaminantes y procesos	Descripción	Fuentes
Contaminantes orgánicos	Se descomponen en el agua y disminuyen el oxígeno disuelto, induciendo la eutrofización.	Fuentes industriales, domésticas, asentamientos humanos.
Nutrientes	Incluyen principalmente fosfatos y nitratos, su incremento en el agua induce a una eutrofización. Se originan de desechos humanos y animales, detergentes y escorrentía de fertilizantes agrícolas	Fuentes domésticas, industriales, agricultura.
Metales pesados	Se originan principalmente alrededor de centros industriales y mineros. También pueden provenir de actividades militares o a través de lixiviados.	Fuentes industriales, mineras, asentamientos humanos, actividades militares.
Contaminación microbiológica	Desechos domésticos no tratados, criaderos de animales ( <i>E. coli</i> , protistos, amebas, etc.).	Fuentes municipales.
Compuestos tóxicos orgánicos	Químicos industriales, dioxinas, plásticos, pesticidas agrícolas, hidrocarburos, hidrocarburos policíclicos. Compuestos orgánicos persistentes (POP) como químicos disruptores endocrinos, cianotoxinas.	Fuentes industriales, asentamientos humanos, agricultura.
Químicos traza y compuestos farmacéuticos	Desechos hospitalarios, son sustancias peligrosas no removidos necesariamente por los tratamientos convencionales y han sido reconocidos con disruptores endocrinos y carcinogénicos.	Industria química y farmacia.
Partículas suspendidas	Pueden ser orgánicas o inorgánicas y se originan principalmente de prácticas agrícolas y del cambio en el uso de la tierra, como deforestación, conversión de pendientes en pastizales originando erosión.	Industria, asentamientos humanos, agricultura y cambios en el uso de la tierra.
Salinización	Se produce por la presencia de sales en los suelos y drenajes inadecuados. También ocurre por afloramiento de agua proveniente de zonas altas, donde se riega (lavado de sales).	Presencia de sales en los suelos, la que aflora por carecerse de un buen drenaje, irrigación con agua salobre, agua de yacimientos secundarios de petróleo.
Acidificación	Está relacionada con un pH bajo del agua dado por la deposición sulfúrica producida por la actividad industrial y por las emisiones urbanas.	Fuentes industriales y fuentes municipales.

Fuente: (EPA, 2000)

### **2.1.2 Contaminación por metales pesados**

Los metales pesados pueden definirse como elementos naturales que poseen un alto peso atómico y una densidad de al menos cinco veces mayor que la del agua (Eeckhout, 2007), también se presentan en diferentes estados de oxidación en agua, aire y suelo, además poseen diversos grados de reactividad, carga iónica y solubilidad en agua (Yarto, 2009). Estas sustancias tóxicas tienden a subsistir indefinidamente en el medio ambiente, complicando el bienestar y equilibrio no solo de la fauna y la flora existente en dicho ecosistema sino también la salud de las comunidades vecinas, por concepto de su acumulación e ingreso a la cadena trófica (García *et al.*, 2011; Farooq *et al.*, 2010).

Desde los inicios de la revolución industrial, los metales se han ido incorporando y acumulando lentamente en el ambiente, reservándose en el suelo, sedimentos y aguas superficiales (Eeckhout, 2007), además también se han detectado en el organismo humano (Zhao *et al.*, 2006).

Las diversas aplicaciones de los metales pesados, van desde industriales, domésticas, agrícolas, médicas y tecnológicas (Wittmann, 1981), dichos usos han provocado su amplia distribución en el ambiente; ocasionando preocupaciones sobre sus efectos potenciales en la salud pública (EPA, 2000). Estas sustancias están vinculadas con los ciclos biogeoquímicos, siendo que de esta manera se afecta la estabilidad del metal, a causa de las reacciones químicas que se llevan a cabo en los ciclos de planeta (Eeckhout, 2007).

Una investigación elaborada por Simeonov *et al.* (2003) en el Norte de Grecia, demostraron que debido a la lixiviación de metales pesados en el suelo, entre ellos el Cromo (Cr), llegaban a contaminar el agua potable de ese país, otro ejemplo es en el país de la India, donde el sector industrial descarga sus aguas residuales a mantos acuíferos, ocasionando el mismo problema (Gowd *et al.*, 2008).

Por otro lado en Dhaka, Bangladesh se vertían efluentes de industrias, pesticidas y aguas residuales domesticas al Río Buriganga, estas descargas llevaban consigo una gran cantidad de metales (Ahmad *et al.*, 2010).

### **2.1.3 Contaminación por Cr<sup>+6</sup>**

El Cr es un elemento metálico de transición ubicado en el grupo VI-B de la tabla periódica, tiene un número atómico de 24 y un peso atómico de 51.996. Los estados de oxidación del Cr son: -2, 0, +2, +3 y +6; los procedentes de las valencias -2 y +2 posee poca importancia, el 0 corresponde al Cr metálico y los únicos elementos de mayor relevancia biológica son los derivados de los estados de oxidación +3 y +6. Este metal es el séptimo elemento más abundante en la tierra, habitualmente se localiza en rocas, suelos, plantas, animales, aire, agua, emisiones volcánicas y alimentos. Se caracteriza por ser inodoro e insípido, puede encontrarse en los tres estados de la materia: líquido, sólido y gaseoso (ATSDR, 2008; INC, 2015; Cervantes, 1999).

Los autores McGrath *et al.* (1990) comparan los dos estados de oxidación del metal de acuerdo a su movilidad, donde menciona que el Cr<sup>+3</sup> al originar óxidos, hidróxidos o sulfatos, tiende a ser mucho menos móvil y se encuentra presente en la materia orgánica del suelo y en ambientes acuáticos por otro lado el Cr<sup>+6</sup> es un agente oxidante más potente y en presencia de materia orgánica se reduce a Cr<sup>+3</sup>; esta metamorfosis es más rápida en ambientes ácidos como los suelos ácidos.

La ATSDR (2008) argumenta que los compuestos que forma el Cr no presentan ningún olor o sabor especial, siendo utilizados ampliamente en la industria (Cuadro 2).

Cuadro 2. Usos comunes de los compuestos de Cr, Cr<sup>+3</sup> y Cr<sup>+6</sup>

Metal	Usos industriales
Cr	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabricación de acero</li> </ul>
Cr <sup>+3</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cromado</li> <li>• Colorantes y pigmentos</li> <li>• Curtido de cuero</li> <li>• Preservación de madera</li> </ul>
y Cr <sup>+6</sup>	<p>En cantidades pequeñas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Barrenas para la extracción de petróleo</li> <li>• Inhibidores de corrosión</li> <li>• La industria textil</li> <li>• El tóner para copadoras</li> </ul>

Fuente: (ATSDR, 2006)

Las industrias con mayor impacto por la presencia de Cr, según su rama o tipo, son las de cemento, colorantes, construcción, curtidorías, metalurgia, pinturas (anticorrosivas) y material fotográfico (Marino *et al.*, 2006).

El Cr<sup>+3</sup> es un nutriente esencial y es relativamente no tóxico para hombre, es un elemento secundario necesario para mantener un buen estado de salud, ya que ayuda al cuerpo a utilizar el azúcar, la grasa y las proteínas. Sin embargo, el Cr<sup>+6</sup> es un riesgo para la salud de los humanos, principalmente para la gente que trabaja en la industria del acero y textil (ATSDR, 2008; WHO, 1988).

#### 2.1.4 Contaminación de Cr<sup>+6</sup> en México

En México, han ocurrido dos casos representativos de contaminación por Cr<sup>+6</sup>, estos fueron provocados por las empresas Cromatos de México y Química Central, que a pesar de los años aún sigue causando daños al ambiente por aquellos residuos que fueron abandonados en las instalaciones de las compañías (Rosales, 2014).

La empresa Cromatos de México, se fundó en 1958 en la colonia Lechería, ubicada en el municipio Tultitlán, Estado de México (Castro, 2009). La compañía fabricaba dicromato de sodio ( $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) para el curtido de pieles y dicromato de potasio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) que era utilizado en la industria cerillera, al producir estos compuesto se generaban subproductos como Sulfato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), Sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) e Hidróxido de aluminio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), además emanaban contaminantes a la atmósfera procedentes de los hornos de calcinación que a su vez generaban un subproducto denominado escorias o pellets; del mismo modo, descargaban aguas residuales originadas de las tinas de sedimentación del licor de cromato donde se obtenían residuos de sales de  $\text{Cr}^{+6}$ , cada una de esas acciones repercutieron en el suelo, subsuelo y los acuíferos (SEMARNAT, 2010).

Las autoridades del Estado de México clausuraron la empresa de forma definitiva en 1978, posteriormente se realizaron estudios en el área contaminada, de los cuales se observó que el  $\text{Cr}^{+6}$  llegó a 322 m de profundidad contaminando pozos de agua potable (Rosales, 2014).

En el año 1982, se realizaron análisis en muestras de cabello y orina por el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM donde se confirmó la presencia de altos niveles de contaminación del químico en 160 habitantes de la colonia Lechería. Tras el cierre de la fábrica, el lugar se convirtió en el cementerio de residuos tóxicos más peligroso de América Latina (Méndez, 2017).

El segundo caso ocurrió en el 2005 siendo la responsable la empresa Química Central de México, perteneciente a San Francisco del Rincón, Guanajuato, esta industria se dedicaba a la producción de sulfato de cromo ( $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ ),  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  y ácido crómico ( $\text{H}_2\text{CrO}_4$ ) utilizados en el procesamiento de piel, en dicha empresa se encontraron altas concentraciones ( $2.777 \text{ mgL}^{-1}$ ) en el suelo y alrededores de la empresa (Fonseca, 2016; Rosales, 2014).

El 4 de junio del 2014, autoridades clausuraron la empresa por incumplir con las leyes ambientales luego de operar durante 46 años en los que acumularon más de 300 mil toneladas de desechos que aún permanecen en la parte trasera de la fábrica (García, 2017).

Otro caso de contaminación por  $\text{Cr}^{+6}$  ocurre en Guadalajara, el relleno sanitario Laureles que está a cargo de la empresa Caabsa Eagle le ha solicitado a SEMARNAT su ampliación, dado que su capacidad de almacenamiento se está agotando, aunque su vida útil fue documentada hasta el 2030 sin embargo, esta dependencia se la ha negado, debido a tres razones importantes: la cercanía con reservas urbanas, su opacidad y los altos niveles de contaminación con metales pesados. Dicha empresa presentó un informe donde muestran los análisis realizados a los lixiviados del vertedero y al agua del Río Santiago que transita a 60 m de distancia del relleno, en el que ambos estudios muestran presencia de Cr.

Es importante mencionar que la empresa encargada del vertedero aún no solicita su trámite de renovación y mientras no complementa la información necesaria no se le podrá conceder la ampliación de su licencia ya que con esa información se determina si ha llegado a su vida útil o cuánto tiempo de utilidad le queda (Meléndez, 2018).

En un reporte elaborado por Lemus, (2016) se menciona que de los 653 ríos o que están distribuidos en México, 208 se reportan fuertemente contaminados y al menos siete de los principales ríos han pasado a ser afluentes contaminados por la carga residual que reciben diariamente. Se han encontrado metales pesados como el  $\text{Cr}^{+6}$  y otros contaminantes que rebasan sus límites permisibles en los ríos como el Turbio localizados en Guanajuato, el Balsas de Guerrero y el Santiago en Jalisco, también en los lagos de Cuitzeo en Michoacán y Chapala en Jalisco.

## 2.2 Riesgo Ambiental

El Cr también puede ser liberado al ambiente por la quema de gas natural, petróleo o carbón. Todas estas emisiones van principalmente a tres medios receptores: aire, agua y suelo (ATSDR, 2016). Aunque los más afectados siempre son el agua y suelo, pues en estos ecosistemas se dan los cambios de oxidación del Cr, aunque las transformaciones de este elemento ocurren de acuerdo a las condiciones del ambiente en el que se encuentran (ATSDR, 2008).

En los ecosistemas acuáticos la toxicidad de los compuestos del Cr depende de la temperatura, pH y dureza del agua, así como también de los organismos que habitan ahí. Al llegar los compuestos de  $\text{Cr}^{+6}$  al agua se diluyen con facilidad y pueden ser lo suficientemente estables y transitar libremente por el agua, pero dadas las condiciones naturales y la presencia de materia orgánica junto con otros compuestos, se reduce rápidamente a sustancias más estables y menos hidrosolubles. Generalmente se reducen a  $\text{Cr}^{+3}$  el cual se precipita y se transforman en partículas suspendidas y sedimentos, varios estudios demuestran la acumulación de este metal en diversas especies acuáticas, principalmente en peces que se alimentan del sustrato, como el bagre (*Ictalurus nebulosus*), los bivalvos, como la ostra (*Crassostrea virginica*), el mejillón azul (*Mytilus edulis*) y la almeja de caparazón blando (Gazzola *et al.*, 2014; Chávez, 2010; Orozco *et al.*, 2007). Además, el Cr puede dañar las agallas de los peces que nadan cerca del punto de descarga (Quintana *et al.*, 2015). Aunque Moore *et al.* (1984) afirma que la toxicidad del  $\text{Cr}^{+3}$  y  $\text{Cr}^{+6}$  en los organismos acuáticos es relativamente baja, en comparación con otros metales como Hg, Cd, Cu, Pb, Ni y Zn los cuales son más tóxicos que el Cr.

Cuando las concentraciones de Cr aumentan en el suelo, provoca una mayor concentración en las plantas, llegando a causar afectaciones en su crecimiento (en raíces y la parte aérea), inhibición de la germinación y persuasión de clorosis (Gunsé, 1987). Un estudio realizado por Bishnoi *et al.*, (1993) demostró que los

iones de  $\text{Cr}^{+6}$  reducen notablemente la capacidad general de *Pisum sativum* L (chícharo) para llevar a cabo la fotosíntesis, la respiración y la fijación de nitrógeno (N). Especies como *Alternanthera philoxeroides* y *Borreria scabiosoides* mostraron alteraciones en los cloroplastos y núcleos (Mangabeira *et al.*, 2011). Dos estudios aplicados a *Pteris vittata* presentaron estrés hídrico y trastornos en la estructura interna (en hojas y degradación celular de las raíces) (de Oliveira *et al.*, 2014; Sridhar *et al.*, 2011)

En una reseña toxicológica del Cr divulgada por la ATSDR, (2000) se dieron a conocer las afectaciones que presentan los animales al estar en contacto con el Cr, aquellos que respiran altos niveles de Cr presentaron daños en su sistema respiratorio y una disminución en su capacidad para combatir enfermedad, por otra parte los ratones hembra que ingirieron  $\text{Cr}^{+6}$  engendraron un número menor de crías y además nacieron con defectos, mientras que en los machos se observó un descenso del número de espermatozoides. Los compuestos de Cr pueden llegar a desarrollar cáncer de pulmón en animales que respiran o ingieren esas sustancias.

### **2.2.1 Toxicología ambiental**

La toxicología ambiental, es definida por la ATSDR, (2009) como la rama que estudia las sustancias químicas que contaminan el medio ambiente. Además, se encarga del estudio de sustancias tóxicas que ingresan a cuerpos de agua como lagos, arroyos, ríos y océanos. Esta ciencia estudia la forma en que las diferentes plantas, animales y seres humanos son afectados por la exposición a sustancias tóxicas.

La toxicidad depende de varios factores, en los que influyen algunos parámetros como la dosis, ruta de exposición, especies químicas, edad, género, genética y estado nutricional de los individuos expuestos a estos contaminantes (Tchounwou *et al.*, 2012).

El  $\text{Cr}^{+6}$  es un peligro para la salud del ser humano, en específico para las personas que trabajan en la industria textil y de acero, de igual manera personas fumadoras de tabaco están expuestas a un alto nivel de  $\text{Cr}^{+6}$  (Barkat *et al.*, 2009).

Los daños al estar en contacto con el  $\text{Cr}^{+6}$  puede llegar a causar desde irritaciones y lesiones en la piel y ojos, así como dermatitis alérgica y pérdida de apetito, sin embargo, cuando se está expuesto a altas concentraciones durante un periodo prolongado, puede ocasionar daños al cerebro, hígado, riñón, sistema circulatorio y nervioso, enfermedades como anemia incluso se puede desarrollar cáncer de pulmón, nariz y laringe, alcanzando a provocar en ocasiones la muerte (Griswold *et al.*, 2009; EPA, 2000). Del mismo modo, varios estudios encontraron que las personas expuestas a altos niveles Cr en el agua potable y embotellada, fueron adversamente afectadas y sufrieron asma, úlceras y enfermedades en la piel así como también efectos sobre la función renal y los niveles de hemoglobina (Badr *et al.*, 2011; Gowd *et al.*, 2008). En Karachi, Pakistán a través del consumo de agua potable que contenía Cr y otros metales, se determinó que las fracciones consideradas como peligrosas para la ingestión y las rutas cutáneas estaban en los rangos 0.011 – 0.14 y 0.000085 – 0.098 (Karim, 2011). Por estas razones la IARC, (2012) ha clasificado el  $\text{Cr}^{+6}$  en el Grupo 1 (cancerígeno para el ser humano) y el  $\text{Cr}^{+3}$  en el Grupo 3 (No clasificable en cuanto a su carcinogenicidad para los seres humanos).

Los compuestos de Cr soluble, como el cromato de potasio ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ), el bicarbonato de potasio ( $\text{KHCO}_3$ ) y el ácido crómico ( $\text{H}_2\text{CrO}_4$ ) tienen una Dosis Letal Media (DL50) de aproximadamente  $50 \text{ mgkg}^{-1}$ . La toxicidad de cada compuesto depende de su estado de oxidación, al consumir de 1 a  $2 \text{ mgCr}^{+6}\text{kg}^{-1}$  provoca una insuficiencia renal aguda (Gazzola *et al.*, 2014; IRIS, 1988).

El  $\text{Cr}^{+6}$  puede entrar al cuerpo humano por tres rutas: inhalación, ingestión y adsorción dérmica, los principales órganos diana suelen ser pulmones, ganglios linfáticos, bazo, riñón e hígado, para después ser capturado por los eritrocitos,

posteriormente es combinado con la parte glóbica de la hemoglobina y es incorporado a otras células por el sistema transportador de sulfatos (Lauwerys, 2007; ATSDR, 2006; IRIS, 1998).

El  $\text{Cr}^{+6}$  al interactuar de manera intracelular, ya sea, en las mitocondrias o en el núcleo es reducido a  $\text{Cr}^{+3}$  (Lauwerys, 2007; IRIS, 1998; Colombia, Ministerio del Trabajo y Seguridad Social, 1997; Irwin *et al.*, 1997), lo mismo pasa a nivel del citoplasma esto ocurre por reductores como el ácido ascórbico, el glutatión, las flavo enzimas y riboflavinas. Durante la sintonización intracelular se producen intermediarios reactivos como  $\text{Cr}^{+5}$ ,  $\text{Cr}^{+4}$  y  $\text{Cr}^{+3}$ , del mismo modo interactúan radicales libres hidroxilo (OH) y oxígeno ( $\text{O}_2$ ), dichos estados de oxidación del Cr pueden afectar el ADN (Lauwerys, 2007; ATSDR, 2006; IRIS, 1998; Irwin *et al.*, 1997).

El principal mecanismo de eliminación se da por vía renal, aunque también se puede liberar por medio de heces (vía biliar), cabello, uñas, sudor y leche (en el caso de las madres lactantes (Lauwerys, 2007; Alcaldía Mayor de Bogotá, 2003; IRIS, 1998; Céspedes, 1994; Marrett *et al.*, 1986).

Los dicromatos, el ácido crómico ( $\text{H}_2\text{CrO}_4$ ) y otros derivados del  $\text{Cr}^{+6}$  tienen un gran potencial irritante y corrosivo. Estos compuestos al estar en contacto con la piel provocan úlceras, puede ser más grave cuando la piel se encuentra agrietada, además se pueden desarrollar en la raíz de las uñas, los nudillos, los dedos, el dorso de las manos y los antebrazos. Los primeros síntomas se manifiestan con una pápula de bordes elevados y centro costroso hasta formarse la úlcera. Estas logran penetrar intensamente en los tejidos blandos o inclusive proliferar una infección secundaria, sin embargo, no llegan a provocar una enfermedad maligna. Su proliferación no suele provocar dolor mientras se despliega la ulceración, siendo que ocurre una toxicidad en los nervios sensoriales periféricos. Las lesiones desaparecen lentamente o pueden tardar meses. Se tiene conocimiento que el 20% de los obreros expuestos a elevadas concentraciones de Cr llegan a

desarrollar dermatitis, principalmente los trabajadores de cemento, de metales, pintores y curtidores (Gazzola, 2014; ATSDR, 2006).

Balakrishnan *et al.* (2013) mencionan que al estar expuestos a  $K_2Cr_2O_7$  equivalentes a  $10 \text{ mgKg}^{-1}$  de peso corporal, se observó una disminución significativa en los mecanismos de marcadores antioxidantes (superóxido dismutasa y el glutatión) del mismo modo se vio un incremento significativo en las concentraciones de marcadores de peroxidación lipídica, malondialdehído y grupos carbonilo de tipo proteicos, también se ha observado una disminución significativa en la moléculas antioxidantes de tipo no enzimático (glutatión peroxidasa y superóxido dismutasa) de igual modo se observó un incremento en las concentraciones de biomarcadores de daño hepático como la aminotransferasas plasmáticas, actividades de lactato deshidrogenasa y bilirrubina. De acuerdo con la histología se sabe que el Cr provoca hemorragia, infiltración de leucocitos y necrosis (Soudani *et al.*, 2013). Otra investigación indica que el  $Cr^{+6}$  es apto para provocar la aparición de apoptosis (Pan *et al.*, 2012). Del mismo modo se ha evidenciado que la toxicidad inducida por este elemento se refleja mediante su acumulación en el tejido hepático, ligado a la disminución significativa de la concentración de grupos sulfhidrilo no proteicos y al incremento en los niveles de peroxidación lipídica (Boşgelmez *et al.*, 2008).

El riñón es uno de los principales órganos que recibe mayor deterioro en contextos de exposición a este elemento (Barbier *et al.*, 2005),

por esta razón el Cr es considerado un potente nefrotóxico tanto en humanos como en animales (Parveen *et al.*, 2009). En la investigación de Kim *et al.* (1991) muestran el grado de nefrotóxicidad por acción de dicromato de sodio, este compuesto fue administrado a dos grupos de ratas, la primera fue inyectada por vía subcutánea, la cual ocasionó alteraciones en el riñón, y la segunda fue aplicada por vía Intraperitoneal, donde se observó que en esta fue menor el daño, con este experimento se pudo apreciar que la toxicidad considera la ruta por la que entra este compuesto. Dartsch *et al.* (1998), remarcaron que el Cr origina

proteinuria severa en forma gradual, seguida de poliuria y glucosuria, llegando a sus concentraciones máximas tres días después del tratamiento en el grupo de subcutánea mientras que el grupo intraperitoneal únicamente se produjo proteinuria en menor grado. Otro estudio revela que las células epiteliales renales son diez veces más sensibles al tratamiento con  $\text{Cr}^{+6}$  en comparación con las células epiteliales del hígado, además se ve afectado el tamaño celular a causa del fenómeno lítico.

El  $\text{Cr}^{+3}$  puede ser tóxico a altas concentraciones llegando a inducir muerte celular, (Huk *et al.*, 2004). En diversos estudios se demuestra el daño preferible del Cr a la sección contorneada de los túbulos proximales (Barrera *et al.*, 2003; Pedraza-Chaverri *et al.*, 1995; Berry *et al.*, 1978; Franchini *et al.*, 1978; Evan *et al.*, 1974), también se da la una probable inducción de necrosis aguda desarrollada en los túbulos renales (Barrera *et al.*, 2003; Franchini *et al.*, 1978). Una publicación elaborada por Fatima *et al.* (2005) demostraron que el transporte del fósforo inorgánico y la actividad enzimática de la membrana de borde en cepillo disminuyen significativamente después de aplicar  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  en una dosis de  $15 \text{ mgkg}^{-1}$  de peso corporal, sin embargo, después de ocho días de la administración se recuperan sus valores normales.

Se sabe que la metalosis observada después de una artroplastia de cadera usando una prótesis con aleaciones de cobalto-cromo, manifiesta perturbación sensorial progresiva, pérdida de audición e hipotiroidismo (Attarian, 2011; Ikeda *et al.*, 2010), también se puede sufrir neuropatía (Ikeda *et al.*, 2010). Un estudio realizado en ratas albinas Wistar expuestas a  $\text{Cr}^{+6}$  provoca disminución de la actividad motora, dicha manifestación se considera una neurotoxicidad (Diaz-Mayans *et al.*, 1986). Otras alteraciones que puede sufrir el sistema nervioso central pueden ser vértigo, convulsiones, alteración al estado de conciencia y hasta la muerte (Gazzola *et al.*, 2014).

El cáncer respiratorio es el efecto de salud de mayor preocupación ya que es la base de la regulación del  $\text{Cr}^{+6}$ . Existen indicaciones de que el  $\text{Cr}^{+6}$  puede causar cáncer en las vías respiratorias superiores y del tracto gastrointestinal superior, como el esófago, la laringe, la tráquea y el estómago (Alexeeff *et al.*, 1989). Este elemento es considerado un carcinógeno de contacto para el sistema respiratorio. No se ha encontrado que esta sustancia provoque cáncer de piel, a pesar de que hay mayor contacto más frecuencia que en otras partes del cuerpo. Del mismo modo, no existen estudios donde se diga que el  $\text{Cr}^{+6}$  sea carcinógeno para los órganos ya que su único contacto es por el torrente sanguíneo (sin mencionar los pulmones, riñones, hígado). Se han realizado exámenes de autopsia en pulmones humanos donde resultó que el Cr inhalado afirmativamente es acumulado en ese órgano, la concentración puede ir aumentado de acuerdo con la edad sin importar la manera de exposición (ocupacional o ambiental) (Kollmeier *et al.*, 1990; Kollmeier *et al.*, 1987).

Se sabe que algunos complejos de  $\text{Cr}^{+6}$  dañan el ADN en ausencia de agentes reductores (Bartholomäus *et al.*, 2013). Estudios comprueban que el  $\text{Cr}^{+6}$  no interactúa directamente con el ADN, sino que son sus metabolito intermediarios y los radicales libres que se forman en los procesos de reducción causando daño oxidativo. La reacción oxidativa puede suceder en el azúcar desoxirribosa lo que ocasiona un quebrantamiento en la cadena del ADN o en las bases del ácido nucleico, llegando a generar lesiones de tipo oxidativo (Slade *et al.*, 2005). El  $\text{Cr}^{+3}$  también puede causar daños en la topología del ADN y seguidamente en los métodos que implican el crecimiento y la propagación celular, debido a que el  $\text{Cr}^{+3}$  se adhiere dentro de la célula, por esta razón lo convierte en un agente mutagénico y carcinogénico siempre y cuando sean inadecuados la ingesta y el nivel de exposición (Plaper *et al.*, 2002).

### 2.3 Remoción del Cr<sup>+6</sup>

Existen una gama extensa de tratamientos para remover el Cr<sup>+6</sup>, estas se clasifican en métodos de remediación químicos (oxidación reducción, adsorción y precipitación), biológicos (reacciones de oxidación-reducción enzimáticas efectuadas por microorganismos y fitorremediación) y físicos (Hawley *et al.*, 2004).

Una de las técnicas ampliamente utilizadas en el sector industrial es la precipitación química, tiene como objetivo eliminar la presencia de metales disueltos en el agua, para ello es necesario la adición de un agente químico (Eilbeck *et al.*, 1987), son ampliamente utilizados: el sulfato ferroso (FeSO<sub>4</sub>), bisulfito de sodio (NaHSO<sub>3</sub>), tiosulfato de sodio (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), metabisulfito de sodio (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) o el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) (Eckenfelder, 2000). Sin embargo, al momento de darle mantenimiento su costo es muy elevado a causa de la gran generación de lodos (Huisman, *et al.*, 2006).

Otro método es óxido-reducción, éste se basa en la transformación de un contaminante por la acción de un compuesto que opera como agente oxidante o reductor, es decir, el compuesto tóxico se trasforma en uno menos peligro o permite que este sea más fácil de eliminar; un ejemplo es la reducción del Cr<sup>+6</sup> a Cr<sup>+3</sup>, como paso previo a su precipitación. Algunos de los agentes reductores utilizados para esta reacción son SO<sub>2</sub> y sus sales, NaHSO<sub>3</sub> o el ion ferroso (Fe<sup>+3</sup>) (Eilbeck *et al.*, 1987).

El intercambio iónico es un proceso de sustitución de iones presentes inicialmente en la superficie del sólido por iones de la misma carga que se encuentran en la disolución. El material de intercambio más utilizado es la resina y la manera más frecuente de operación es en forma de columna empaquetada. Existe una gran variedad de resinas y su uso depende del tipo de contaminante, para el caso de metales se usan resinas catiónicas con una matriz de poliestireno o cargada con grupos funcionales (Izquierdo, 2010; Eilbeck *et al.*, 1987).

La ósmosis inversa es un procedimiento capaz de remover hasta el 99.5 % de los contaminantes debido a la capacidad que tiene las membranas para detectar elementos de tan solo 0.0001 mm (Nemerow *et al.*, 1998), el proceso consiste en pasar un efluente a través de membranas semipermeables, para separar e impedir el paso a los sólidos disueltos, los orgánicos, la materia coloidal, organismos, virus y bacterias del agua (Dimas, 2011).

Una nueva tecnología que ha ganado campo en la extracción de metales pesados ha sido la fitorremediación dicho proceso puede realizarse *in situ* o *ex situ*, este consiste en el uso de plantas y microorganismos que establecen una simbiosis para ser capaces de absorber, acumular, metabolizar y/o estabilizar contaminantes, como por ejemplo: metales pesados y radioactivos, compuestos orgánicos y derivados del petróleo (Delgadillo-López *et al.*, 2011).

Las técnicas antes mencionadas (excepto la fitorremediación) obtienen buenos porcentajes de remociones, aunque, se requiere una gran inversión económica para su operación y mantenimiento, dejándolas solo al alcance de algunas industrias capaces de mantener en función estos procesos para el tratamiento de sus efluentes, sin embargo, pueden llegar a remover arriba de 90% de contaminantes específicos, de los que destacan los metales pesados. Por la anterior razón se ha comenzado a buscar otros tipos de tecnologías que sean más económicas, amigables con el medio ambiente y eficientes en la remoción de contaminantes presentes en el agua (Cuellar, 2015; Gupta *et al.*, 2009).

La sorción se define como un proceso fisicoquímico que adjunta los fenómenos de adsorción y absorción de moléculas e iones. Este método tiene como objetivo la remoción de metales pesados, usando como medio de retención diferentes materiales de origen biológico y químico, ya sea que esté vivo o muerto, tales como: algas, hongos, bacterias, cáscaras de frutas, productos agrícolas y algunos tipos de biopolímeros (Cañizares-Villanueva, 2000),

### 2.3.1 Adsorción de Cr<sup>+6</sup> por adsorbentes orgánicos

Existe una extensa gama de investigaciones donde se ha demostrado que la materia orgánica puede utilizarse como un adsorbente para remover Cr<sup>+6</sup> del agua residual, tal es el caso de Albis *et al.*, (2015) donde demuestran la remoción de Cr<sup>+6</sup> utilizando como adsorbente la cáscara de yuca, obteniendo remociones desde un 52% hasta un 70% variando la cantidad del adsorbente agregado. Otro estudio desarrollado por Eggs *et al.*, (2012) se observó que la cáscara de arroz modificada químicamente mostró remociones inferiores, aunque la cantidad del adsorbente fue mucho menor. Castro, (2014) evaluó la capacidad de adsorción de la cáscara de banano maduro, en la que obtuvo un porcentaje máximo de remoción del 51.2± 5.48%. El amaranto junto con la cáscara de mamey son unos de los mejores agentes al remover el 100% de este metal (Rodríguez *et al.*, 2017; Acosta *et al.*, 2012).

En algunos casos, no se presenta una remoción significativa, tal es el caso del olote de maíz, el cual resultó ser un buen oxidante (Velázquez, 2015). Mientras tanto, en un análisis realizado con la cáscara de coco alcanza remociones entre 93.71% y 96.85% (Pérez *et al.*, 2014). La cáscara de naranja puede considerarse como un material adsorbente potencial para la eliminación de iones Cr<sup>+3</sup> (Pinzón-Bedoya *et al.*, 2009), otros de los residuos orgánicos que se han estudiado es la cáscara de pistacho y la *Moringa oleífera* (Galindo *et al.*, 2015), ambos han llegado a remover más del 99% (Moussavi *et al.*, 2010 ). También se ha demostrado que la cáscara de tamarindo (*Tamarindus indica*) logra remover hasta 94.65% de Cr<sup>+6</sup> (Acosta *et al.*, 2010)

## 2.4 Valores Límite

La EPA, la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA) junto con la Administración de Drogas y Alimentos (FDA) son organizaciones federales pertenecientes a los Estados Unidos de América encargadas de desarrollar e

impulsar recomendaciones para protección a la salud pública (Ministerio de Salud, 2010), el cuadro 3 se resumen límites impulsador por las anteriores agencias.

Cuadro 3. Valores límites de diferentes organizaciones

Organización	Valor límite de Cr <sup>+6</sup> (mgL <sup>-1</sup> )
EPA	0.1 en agua potable 0.1 en el agua embotellada
FDA	0.1 en el agua embotellada
USEPA	0.1 en el agua embotellada
NHW (Canadá)	0.5 en el agua potable
WHO	0.5 en el agua potable
NOM-001-SEMARNAT-1996	0.5 en aguas de ríos para uso público urbano y protección de la vida acuática

Fuente: ATSDR, 2016; DOF, 1996

## CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Tratamiento de la Cáscara de Cachichín

El cachichín fue obtenido del mercado municipal de Misantla, Veracruz, en este lugar se compró 1 kg que costo \$100°, solo se ocupó aproximadamente tres puños de cachichín, al cual se le extrajo la semilla para su consumo y la cáscara se apartó en una bolsa plástica (Fig. 1).



Figura 1. Cáscara de cachichín (*Oecopetalum mexicanum*)



Figura 2. Cáscara de cachichín en la bascula

Posterior a esto, se pesó en una balanza comercial TECNO COR (Fig. 2) generando aproximadamente 200 g los cuales fueron depositados en una cubeta de plástico de un volumen aproximado de 5 L (Fig. 3 y 4).



Figura 3. Cáscara en un recipiente para su lavado



Figura 4. Cáscara en el recipiente de plástico

Al tener toda la cáscara en la cubeta se procedió a verterle etanol ( $C_2H_5OH$ ) al 70% (Fig. 5), procurando que éste cubriera completamente todo el material orgánico.



Figura 5. Vertido del etanol



Figura 6. Cáscara en reposo

Con ayuda de unos guantes de látex, se frotó la cáscara y se agitó de manera circular esto para retirar cualquier impureza que se encontrara impregnada, posteriormente se dejó reposar durante tres h (Fig. 6).

Al transcurrir dicho tiempo, se procedió a separar la cáscara del etanol con la ayuda de una malla (Fig. 7).



Figura 7. Separación de la cáscara



Figura 8. Lavado de la cáscara

La cáscara se pasó a una bandeja de plástico, la cual contenía agua (Fig. 8), nuevamente se frotó con las manos para retirar aquellas impurezas que no se lograron desprender en el primer lavado (Fig.9).



Figura 9. Segundo lavado



Figura 10. Cáscara en el deshidratador

Una vez realizado lo anterior, fueron secadas a temperatura ambiente con ayuda de un deshidratador solar, ésta se retiró hasta presentar un peso constante.

### 3.1.1 Molienda, tamizado e hidrólisis

El proceso de molienda se realizó con ayuda de un molino manual Estrella™, que tiene una capacidad de 1 kg, esta operación se desarrolló con el objetivo de disminuir el tamaño de la cáscara de cachichín.

Para realizar el tamizado se ocuparon dos tamaños de mallas diferentes, el de #30 que tiene un tamaño de partícula de aproximadamente 0.297 mm y el de #50 con el tamaño de 0.595 mm (Fig. 11 y 12). Ambos tamaños fueron colocados en vasos de precipitados con sus respectivas etiquetas. Los dos tamaños de partículas fueron repartidos en dos fracciones, la primera se le aplicó un lavado alcalino y la segunda se usó en su forma natural.



Figura 11. Partículas de 0.595 mm



Figura 12. Partículas de 0.297 mm

La hidrólisis aplicada fue alcalina, la cual se llevó a cabo con ayuda del Método Soxhlet, para ello se utilizó un matraz de fondo redondo donde se colocó hidróxido de sodio (NaOH) al 10%, dos cartuchos de celulosa (uno para cada tamaño de partícula) dejando aproximadamente 1 cm de distancia entre la boca del cartucho y las partículas. El procedimiento consistió en ensamblar el Soxhlet y mantener una temperatura constante de 105°C utilizando una parrilla de calentamiento (Fig. 13), realizándose un total de cuatro reflujos.



Figura 13. Equipo Soxhlet

Al terminar los reflujos mediante la hidrólisis, el equipo se dejó enfriar por unos minutos, después se desmontó y se extrajo el cartucho de celulosa, observando que las partículas formaron una pasta, esta se lavó con agua destilada, exprimiendo el cartucho, todo el procedimiento anterior se realizó dos veces. Posteriormente la pasta de cada uno de los cartuchos se trasladó a dos cápsulas de porcelana, ambas capsulas fueron etiquetadas para después llevarlas al deshidratador solar y así eliminar completamente la humedad.

Mientras la pasta perdía humedad, se comenzaban a transformar en polvo, cuando ya estaban completamente descompactadas ambos tamaños fueron depositados en dos vasos de precipitados con una tapa de aluminio y etiquetados.

A la segunda parte no se le aplicó el proceso de hidrólisis, únicamente se trasladaron a vasos de precipitados.

### **3.2 Experimentación**

Es importante mencionar que las concentraciones utilizadas en esta experimentación se determinaron por medio de una curva de calibración en las que se utilizaron tres soluciones de 5, 10 y 25 ppm, leídas en un espectrofotómetro Genesys 10S a una longitud de onda de 542 nm, utilizando como indicador de  $\text{Cr}^{+6}$  el 1,5-Difenilcarbazida (Fig. 14).

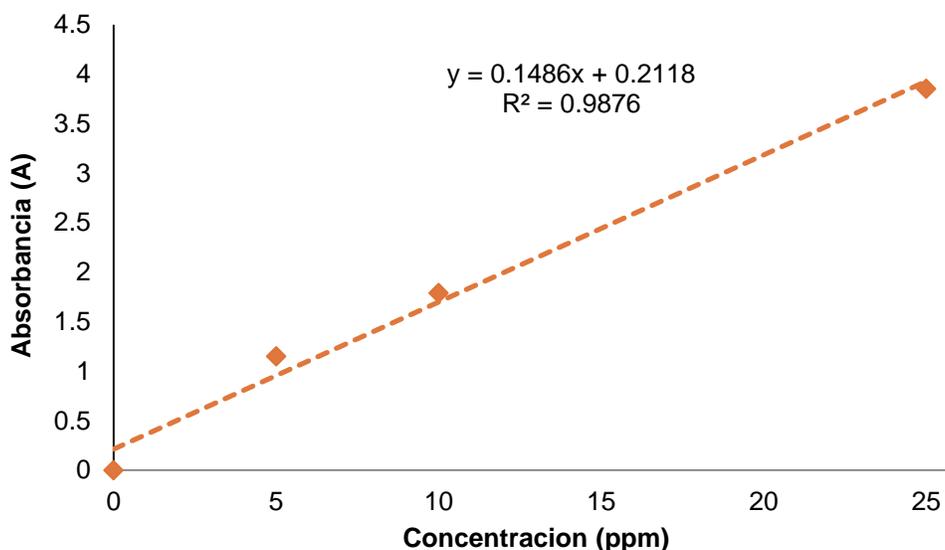


Figura 14. Curva de Calibrado

Para el desarrollo de los experimentos con hidrólisis y sin hidrólisis se tomó como referencia a la investigación desarrollada por Ali *et al.* (2016). Se evaluaron las variables: concentración de  $\text{Cr}^{+6}$ , el tamaño de partícula y masa del adsorbente, igual que el tiempo de contacto (Cuadro 4), en el caso del pH, se mantuvo constante (<3). Para el experimento de adsorción se emplearon tubos de ensaye de 10 mL, donde se vertió 5 mL de la solución de  $\text{Cr}^{+6}$ . Por cada una de las variables se efectuaron tres repeticiones, esto dio un total de 240 pruebas.

Cuadro 4. Variables utilizadas en el proceso de adsorción

Concentración de $\text{Cr}^{+6}$ (ppm)	Tamaño de partícula (mm)	Masa del adsorbente (mg)	Tiempo de contacto (min)
			1
10	0.297	25	15
25	0.595	50	30
			45
			60

Los tubos de ensaye fueron trasladados a un agitador de rotación orbital de velocidad variable CIVEQ ARH-5, donde permanecieron según el tiempo de contacto (Fig. 15).



Figura 15. Agitador CIVEQ ARH-5

### 3.3 Determinación de Adsorción

La capacidad de adsorción del  $\text{Cr}^{+6}$  se determinó utilizando espectrofotometría UV-Vis, la cantidad adsorbida fue calculada mediante la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{W} \quad (\text{Ec. 1})$$

Dónde:

$q_e$ : cantidad de iones adsorbidos

V: volumen de solución (L)

W: masa de adsorbente, (g)

$C_0$ : concentración inicial ( $\text{g L}^{-1}$ )

$C_e$ : concentración en final ( $\text{g L}^{-1}$ )

### 3.4 Análisis Estadístico

Se realizó un Análisis de Varianza ( $\alpha=0.05$ ) para observar las diferencias que pudieran existir entre las variables. En este se implementó una comparación de medias mediante la prueba de Duncan.

Además se aplicó un Análisis Factorial ( $\alpha=0.05$ ) para evaluar las variables y su interacción en el proceso de adsorción, estableciendo el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\tau\delta)_{il} + (\beta\gamma)_{jk} + (\beta\delta)_{jl} + (\gamma\delta)_{kl} + (\tau\beta\gamma\delta)_{ijkl} + \epsilon_{ijkl} \text{ (Ec. 2)}$$

Donde

$Y_{ijkl}$  = Adsorción de  $Cr^{+6}$

$\mu$  = Media general

$\tau_i$  = Efecto del factor de concentración de  $Cr^{+6}$

$\beta_j$  = Efecto del factor tiempo

$\gamma_k$  = Efecto del factor tamaño de partícula

$\delta_l$  = Efecto del factor masa

$(\tau\beta)_{ij}$  = Efecto de la interacción de los factores concentración de  $Cr^{+6}$  y tiempo

$(\tau\gamma)_{ik}$  = Efecto de la interacción de los factores concentración de  $Cr^{+6}$  y tamaño de partícula.

$(\tau\delta)_{il}$  = Efecto de la interacción de los factores concentración de  $Cr^{+6}$  y masa.

$(\beta\gamma)_{jk}$  = Efecto de la interacción tiempo y tamaño de partícula.

$(\beta\delta)_{jl}$  = Efecto de la interacción tiempo y masa

$(\gamma\delta)_{kl}$  = Efecto de la interacción tamaño de partícula y masa

$(\tau\beta\gamma\delta)_{ijkl}$  = Efecto de la interacción concentración de  $Cr^{+6}$ , tiempo, tamaño de partícula y masa

$\epsilon_{ijkl}$  = Error experimental

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Pretratamiento del Adsorbente

A continuación, se describen los resultados obtenidos de la eliminación de la humedad, la molienda y el tamizado de la cáscara de cachichín.

#### 4.1.1 Preparación del biomaterial

Después de haber introducido la masa del biomaterial al deshidratador solar para la eliminación de la humedad, se procedió a obtener el peso seco de la cáscara de cachichín. Dentro de los resultados obtenidos, se logró observar cómo el peso disminuyó de 197 a 157g, lo anterior se ve reflejado en un porcentaje cercano al 20% de pérdida de humedad (Cuadro 5). Esto se le atribuye a que antes de obtener el material ya había pasado por un periodo de secado.

#### 4.1.2 Caracterización del biomaterial

Posteriormente de pasar por el proceso de secado, el material se trasladó a un molino, con la finalidad de reducir su tamaño (Fig. 16).



Figura16. Cáscara de cachichín molida

Una vez realizada la molienda, se procedió a clasificar las partículas por su tamaño, para ello se utilizaron tamices de diferente abertura de malla. Se obtuvieron distintos tamaños, pero los de mayor cantidad fueron los idóneos para trabajar, es decir, el tamaño de partícula con más cantidad de adsorbente fue el elegido), esto fue con el objetivo de tener material adsorbente como reserva. Los tamaños de partícula resultantes fueron 0.595 mm y 0.297 mm (Fig. 17).



Figura 17. Tamaños de partículas obtenidos después de ser tamizadas

#### 4.1.3 Hidrólisis alcalina

Para el caso del material tratado con NaOH por el método Soxhlet mostro un cambio de color y textura, antes del tratamiento su color natural era café claro, después de la modificación química paso a ser negro (Fig. 18) y su textura se tornó suave.



Figura 18. *Oecopetalum mexicanum* modificado químicamente

## 4.2 Efecto del Tiempo en el Proceso de Concentración de Cr<sup>+6</sup>

Es importante resaltar que hasta el momento en la literatura científica desarrollada no existe evidencia acerca del uso de la cáscara de cachichín como adsorbente de Cr<sup>+6</sup>, debido a esto se tiene la necesidad de comparar con los resultados de otras investigaciones de diferentes materiales orgánicos. En la Fig. (19) se observa los porcentajes de remoción en función del tiempo de contacto entre la masa del adsorbente y la solución de Cr<sup>+6</sup>.

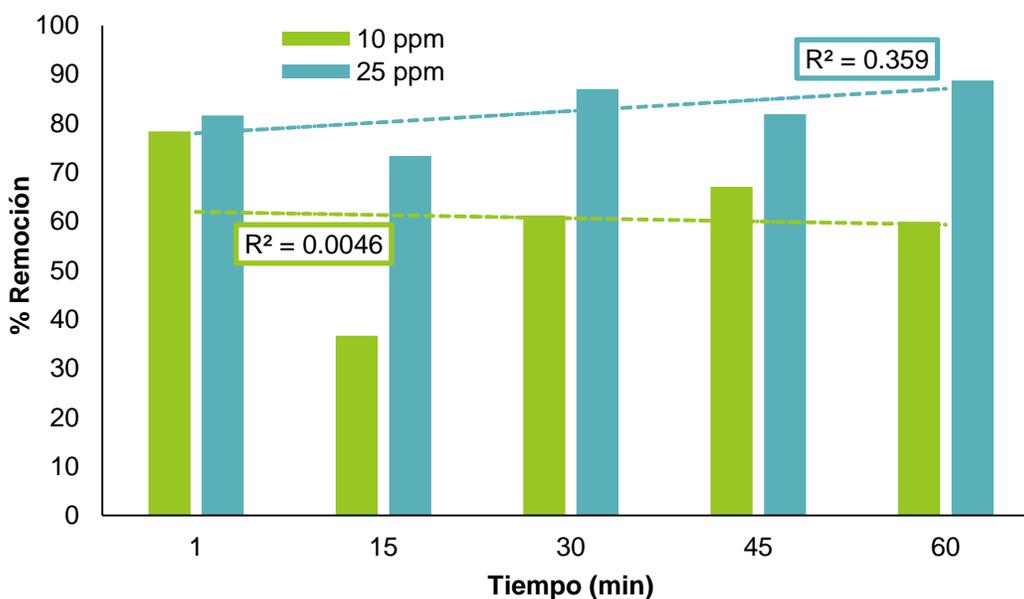


Figura 19. Remoción de Cr<sup>+6</sup> en función del tiempo de contacto

La mayoría de los promedios de remoción para el caso de una concentración de 10 ppm se encuentran por arriba del 60%, caso contrario de los porcentajes de remoción para una concentración de 25 ppm, donde los promedios se encontraron por arriba del 70%, puntualizando que el mayor porcentaje de remoción se encontró a los 60 min a una concentración de 25 ppm, el cual fue de 88%, por otro lado, la capacidad mínima de adsorción en ambas soluciones resultó a los 15 min siendo un 36% y 73% para las soluciones de 10 ppm y 25 ppm respectivamente, sin embargo, la línea de tendencia muestra que la remoción se mantuvo constante en los cinco tiempos de contacto, teniendo en la solución de 10 ppm una

$R^2=0.0046$  mientras que en la de 25 ppm mostro una  $R^2=0.359$ , esto indica que la primera en comparación con la segunda está muy lejos de tener una proporción directa entre la relación del analito en fase acuosa y el biomaterial que lo inmoviliza en su superficie, mientras más se acerque al 0.99 la correlación es más grande.

En un estudio realizado por Rangabhashiyam *et al.* (2015), con la cáscara de *Sterculia guttata* activada con cloruro de cinc ( $ZnCl_2$ ), mostro un equilibrio de adsorción en el intervalo de tiempo de contado entre 60 y 140 min, logrando remover el 100% del  $Cr^{+6}$ , cabe destacar que estos autores utilizaron diferentes concentraciones pero la que obtuvo ese porcentaje de remoción fue con la solución de 100 ppm empleando, además manejan pH de 2 y mantuvieron la temperatura a  $29.85^{\circ}C$ , en cambio la cáscara de cachichín comenzó su equilibrio a los 15 min de contacto en la solución de 10 ppm con porcentaje de remoción del 60%, caso contrario de las solución de 25 ppm la cual tuvo una variación a los 15 y 45 min, pero se estabilizó a los 60 min logrando remover 80%. Es importante señalar que la eliminación de  $Cr^{+6}$  va a depender de la concentración inicial de  $Cr^{+6}$  (Singha et al., 2011).

#### **4.3 Efecto del Tamaño de Partícula en el Proceso de Adsorción del $Cr^{+6}$**

Dentro de la investigación desarrollada por Huamán *et al.* (2008) afirman que es de relevancia el observar la capacidad de adsorción de diferentes materiales que presenten diversos tamaños de partícula; puesto que dicha propiedad juega un papel importante en la adsorción, ya que la superficie de contacto entre el adsorbato y el adsorbente se ve influenciada por la dimensión de la partícula. Para analizar la influencia del tamaño de cáscara de cachichín en la eficiencia de la remoción de  $Cr^{+6}$ , se utilizaron dos tamaños de partícula y dos concentraciones (10 ppm y 25 ppm) manteniendo un  $pH < 3$ . La Fig. 20 muestra los porcentajes de remoción en donde se logra apreciar que estos superan el 59% en ambas soluciones.

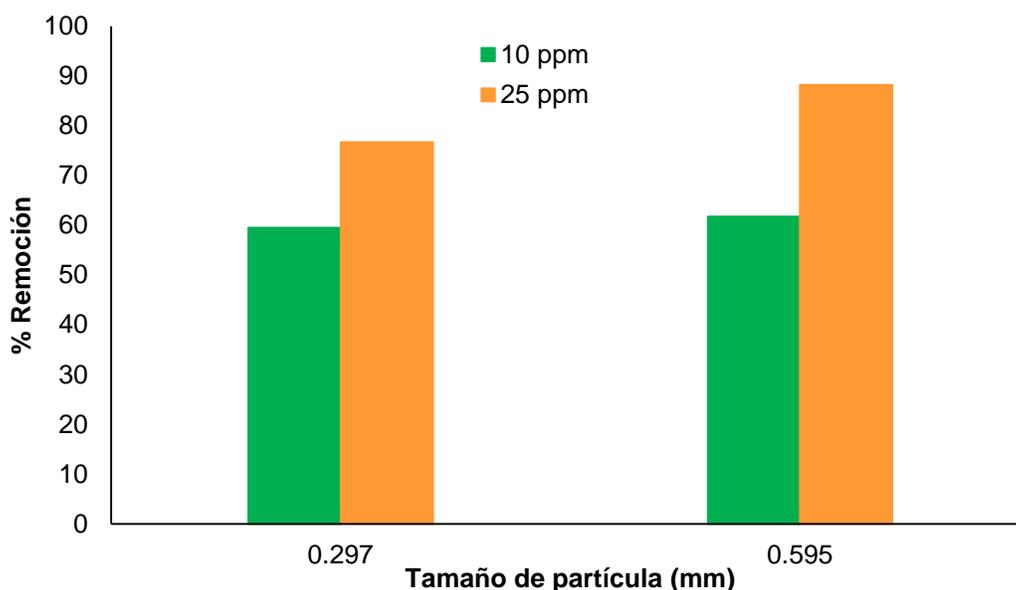


Figura 20. Porcentaje de remoción del  $\text{Cr}^{+6}$  con relación al tamaño de partícula

Se utilizó un tamaño de partícula de 0.297 mm con la concentración de 25 ppm, logrando remover 76% mientras tanto la solución de 10 ppm está por debajo del porcentaje con el 59% de remoción. Garcés *et al.* (2012) emplearon la cáscara de naranja (*Citrus sinensis*), a la cual se le realizó una modificación química con quitosano, manejando un tamaño de partícula de 0.425 mm, logrando tener remociones entre 19% y 61% utilizando una concentración de 100 ppm, comparando este estudio con la remoción de la cáscara de cachichín se observa que el bioadsorbente desarrollado supera al estudio antes detallado, lo anterior puede ser a causa del tamaño de partícula y la solución, porque la concentración empleada es diferente a la que se usó en este análisis y el tamaño de partículas que ellos usaron es diferente en comparación de la de 0.297. Otro estudio analizado es el de Cobos *et al.* (2009), el cual utilizan hojas de café (*Coffea arabica*) con un tamaño de partícula de 0.149 mm llegando a remover 82% para disoluciones de 1000 ppm, es importante señalar que en dicho estudio no se le aplicó ninguna modificación química al bioadsorbente.

#### 4.4 Efecto de la Masa en el Proceso de Adsorción del Cr<sup>6+</sup>

Posteriormente, se evaluó la cantidad de masa (25 y 50 mg) dentro del proceso de remoción (Fig. 21). El punto máximo de remoción fue de 80% el cual se consiguió únicamente en la concentración de 25 ppm, mientras tanto la de 10 ppm obtuvo una remoción constante de 60%, esto porcentajes se vieron reflejados en las dos masas. Dicha figura muestra que conforme aumenta la masa del adsorbente el porcentaje de remoción también lo hace, este suceso se pudo apreciar en la concentración de 25 ppm, mientras tanto la concentración de 10 ppm si aumenta pero muy lentamente en la dos masas. Kadirvelu *et al.* (2000) concuerda con lo expresado anteriormente y se debe tanto a un incremento en el área superficial como en los sitios activos de unión disponible.

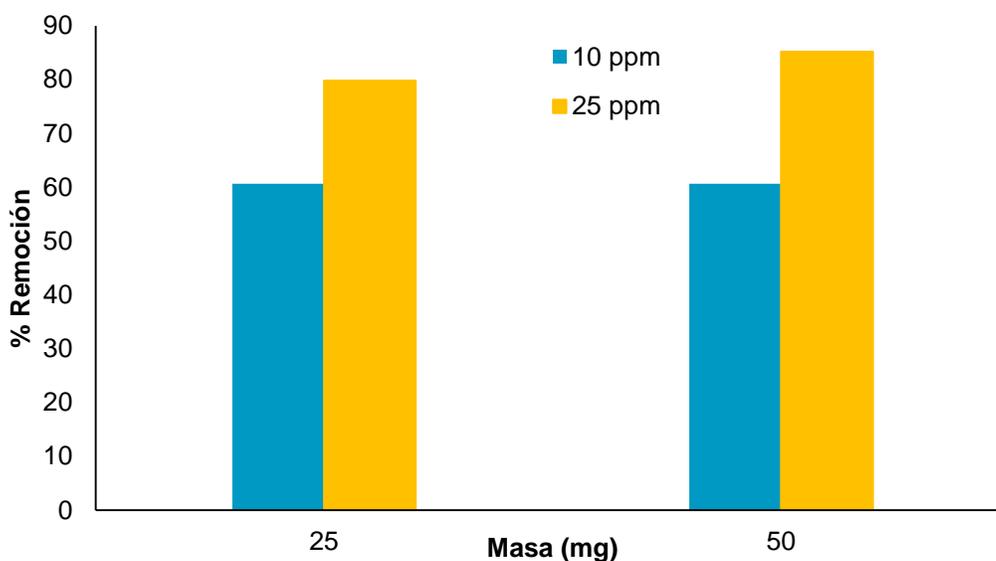


Figura 21. Comparación del porcentaje de remoción en relación a la masa

#### 4.5 Análisis Factorial del Bioadsorbente con Modificación Química

Se aplicó un análisis factorial para conocer la interacción que pudieran existir entre las variables independientes, tomando como variable dependiente el porcentaje de remoción de Cr<sup>6+</sup> (Cuadro 5).

Cuadro 5. Análisis Factorial utilizando adsorbente con modificación química

Origen	F	p	$\alpha$
Modelo corregido	4.805	.000	.05
Concentración	.025	.874	.05
Tamaño de Partícula	39.759	.000	.05
Masa	14.656	.000	.05
Tiempo	7.230	.000	.05
Concentración * Tamaño de Partícula	.026	.871	.05
Concentración * Masa	.682	.412	.05
Concentración * Tiempo	3.903	.006	.05
Tamaño de Partícula * Masa	24.514	.000	.05
Tamaño de Partícula * Tiempo	6.447	.000	.05
Masa * Tiempo	1.786	.140	.05
Concentración * Tamaño de Partícula * Masa	.008	.929	.05
Concentración * Tamaño de Partícula * Tiempo	3.572	.010	.05
Concentración * Masa * Tiempo	1.878	.123	.05
Tamaño de Partícula * Masa * Tiempo	4.330	.003	.05
Concentración * TP * Masa * Tiempo	2.864	.029	.05

$R^2 = 0.714$   $R^2$  ajustada = 0.566  
 TP= Tamaño de Partícula

Se puede apreciar que el modelo propuesto es idóneo ( $0.000 < \alpha = 0.05$ ), por lo tanto el diseño propuesto involucra las variables necesarias para observar la capacidad de adsorción de  $Cr^{+6}$  mediante la cáscara de cachichín. Lo anterior es respaldado por los valores de  $R^2$  puesto que indica el acoplamiento de los valores a la ecuación, así como también se cuenta con una  $R^2$  ajustada que evalúa la exactitud del modelo propuesto (Sánchez, 2018).

La mayoría de las variables sin interacción presentan un efecto sobre la adsorción ( $0.000 < \alpha = 0.05$ ), excepto la variable de concentración que muestra un valor de significancia mayor que el propuesto, sin embargo, Sánchez (2018) muestra en su estudio que la concentración si puede presentar un efecto en la adsorción del  $Cr^{+6}$ .

En lo que corresponde a las interacciones entre las variables se puede observar que la mayoría de ellas demuestran un efecto sobre la remoción del metal pesado. Un ejemplo es la interacción entre todas las variables propuestas; la

concentración, el tamaño de partícula, la masa y el tiempo presentan influencia sobre la adsorción ( $0.029 < \alpha = 0.05$ ), lo mismo pasa con lo realizado por Sánchez, (2018), aunque en este caso, las variables que interactúan son la concentración, la masa y el tamaño de partícula ( $0.001 < \alpha = 0.05$ ), dejando de lado la variable del tiempo, cabe destacar que utilizó como bioadsorbente la cáscara de banano.

#### 4.6 Comparación de Medias de la Prueba de Duncan

Mediante el software estadístico STPSS™, se efectuó la prueba Duncan para evaluar los distintos tiempos de contacto, (Cuadro 6).

Cuadro 6. Prueba Post-Hoc Duncan en función de la variable de Tiempo de contacto

Tiempo	N	Subconjunto	
		1	2
15.00	24	77.0200	
1.00	21	79.3666	
45.00	22		85.1484
60.00	24		86.3357
30.00	24		86.8173
Sig.		.397	.573

$\alpha = .05$ .

Como resultado se obtuvieron 2 subconjuntos, uno formado por los dos primeros tiempos (1 y 15 min) y el segundo por los restantes (30, 45 y 60 min). Como era de esperarse conforme avanza el tiempo de contacto y el proceso de remoción, los valores tienden a estabilizarse, el promedio de remoción durante los últimos tres tiempos se encuentra alrededor del 86% de remoción. Se observa que el tiempo de 30 min alcanzó los promedios de remoción más altos (86.8173%), aunque estadísticamente dicho valor no presenta diferencia significativa con los tiempos de 45 y 60 min. Dentro del primer subconjunto, el tiempo de 15 minutos presentó ligeras variaciones que el de 1 min, pero igual que el caso anterior las variaciones no resultaron ser significativas.

## 4.7 Adsorbente sin Modificación Química

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en la experimentación con el adsorbente sin modificación química.

### 4.7.1 Efecto del tiempo en el proceso de concentración de $\text{Cr}^{+6}$

En esta segunda etapa se muestran, los porcentajes de remoción con respecto al tiempo de contacto de la masa del adsorbente con concentraciones de 10 ppm y 25 ppm (Fig. 22). La concentración de 10 ppm muestra un descenso de remoción conforme avanza el tiempo, se aprecia que en un minuto logra remover casi un 80% y conforme se va aumentando el tiempo de contacto llega a remover el 67%.

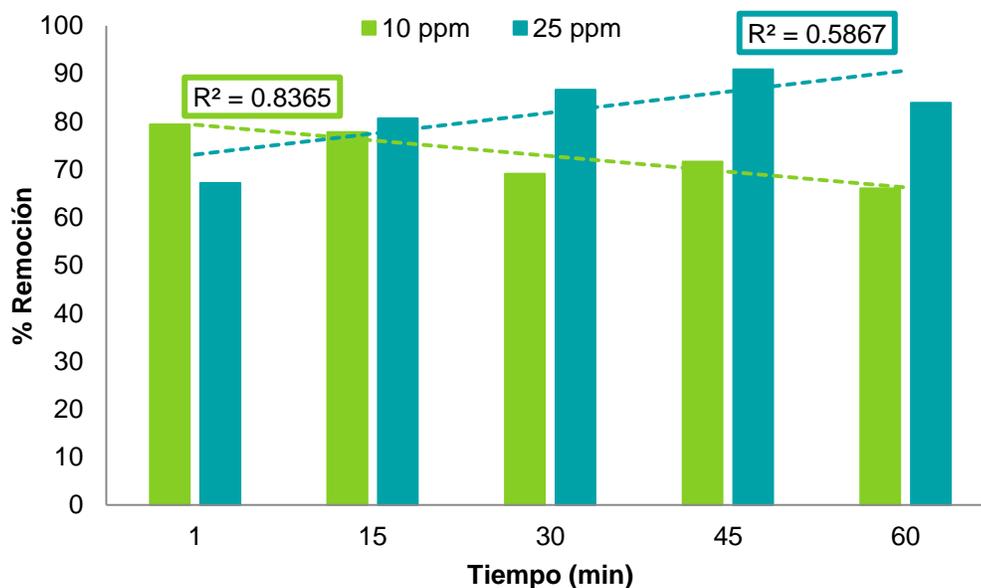


Figura 22. Remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  en función del tiempo de contacto

La solución de 25 ppm presenta un aumento conforme transcurre el tiempo de contacto, en 1 min se logra un 67% de remoción y para 45 min se obtiene casi 91%, cabe mencionar que al estar una hora en contacto la remoción disminuye.

Además, se destacan las líneas de tendencia para ambas soluciones, ya que las dos llegan a intersectarse en un tiempo de 15 minutos, logrando a remover arriba del 70%.

Las  $R^2$  obtenidas en esta fase de experimentación son más cercanas a la linealidad en 10 ppm ( $R^2 = 0.836$ ) que en una concentración de 25 ppm ( $R^2 = 0.586$ ), caso contrario de las obtenidas en la primera fase (10 ppm  $R^2=0.0046$  y la de 25 ppm  $R^2=0.359$ .), mostrando que el efecto del tiempo con la característica de la no modificación química mostró mejores resultados. Esto también ocurrió en una publicación donde utilizaban cáscara de cacao con y sin modificación, obteniendo un 80% de remoción al utilizar las partículas sin modificación química mientras que los resultados con modificación no rebasaban ni siquiera el porcentaje de la biomasa sin modificación (Tejada *et al.*, 2017).

#### **4.7.2 Efecto del tamaño de partícula en el proceso de adsorción del $Cr^{+6}$**

Para este caso la concentración de 10 ppm manifestó una remoción constante del 70% en los dos tamaños de partícula, mientras que la concentración de 25 ppm presentó un 88% de remoción utilizando partículas de 0.297 mm y en el tamaño de 0.595 mm evidenció una disminución en la capacidad de remoción del metal pesado, logrando alcanzar un 75% (Fig. 23), este suceso concuerda con lo estudiado por Tejada *et al.* (2017) ellos usaron la cáscara de cacao con un tamaño de partícula de 0.355 mm, el cual logro remover arriba del 80%, sin embargo, Sala *et al.* (2005) demostraron en su artículo que la *Sargassum fluitans* y *Ascophyllum nodosum* en partículas de mayor tamaño (0.15 y 0.81 mm) obtenían elevada adsorción de metal.

A pesar de lo anterior la literatura sugiere llevar a cabo estudios de caracterización de poros a la biomasa, puesto que el aumento de microporos multiplica el número de sitios accesibles, pero no puede ser relacionado con el tamaño de partícula, porque en realidad, se están manejando partículas con un mismo espesor, que es lo que determina la distancia de difusión y la clasificación de tamaño de la partícula de una biomasa por tamices estándar, que funciona en longitud y ancho (Igwe *et al.*, 2006).

Comparando lo obtenido en los porcentajes de adsorción con hidrólisis y sin ella, queda en evidencia que los porcentajes de remoción aumentaron en el proceso sin hidrólisis con la excepción de la combinación de las partículas con tamaño de 0.595 mm en contacto con 25 ppm.

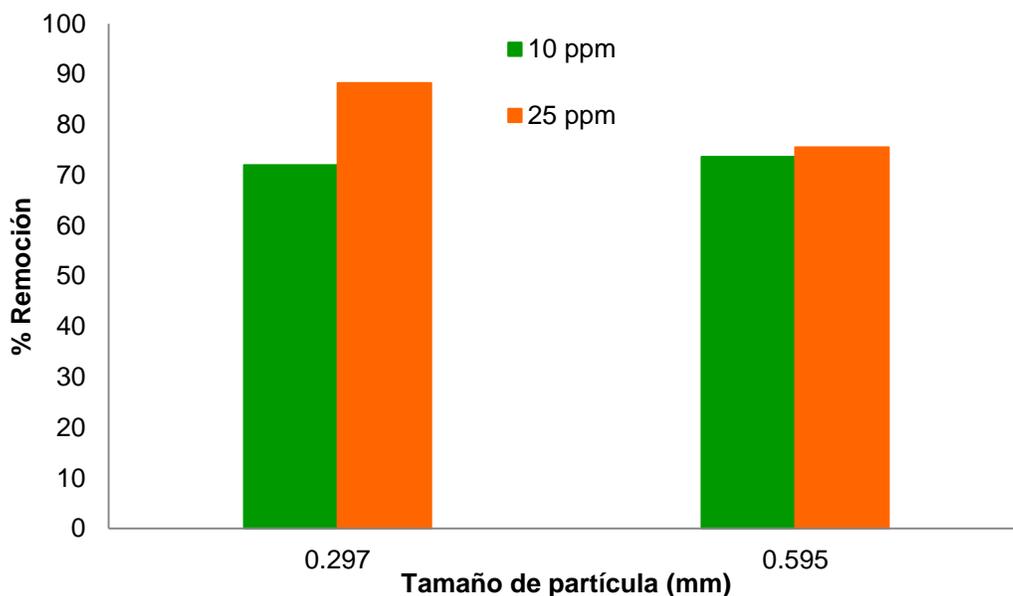


Figura 23. Porcentaje de remoción del  $\text{Cr}^{+6}$  con relación al tamaño de partícula

#### 4.7.3 Efecto de la masa en el proceso de adsorción del $\text{Cr}^{+6}$

Para el caso de la masa utilizada, se notó un aumento de remoción arriba del 50% en las dos concentraciones. La solución de 10 ppm presentó casi un 77% de remoción al emplear 25 mg del adsorbente sin embargo, este porcentaje disminuyó cuando se usó 50 mg llegando a remover solo 69%, el comportamiento de la solución de 25 ppm fue de manera creciente ya que conforme aumentaba la masa este mostraba mayor remoción, al utilizar 25 mg la remoción fue de 54% y con 50 mg se logró 61% (Fig. 24).

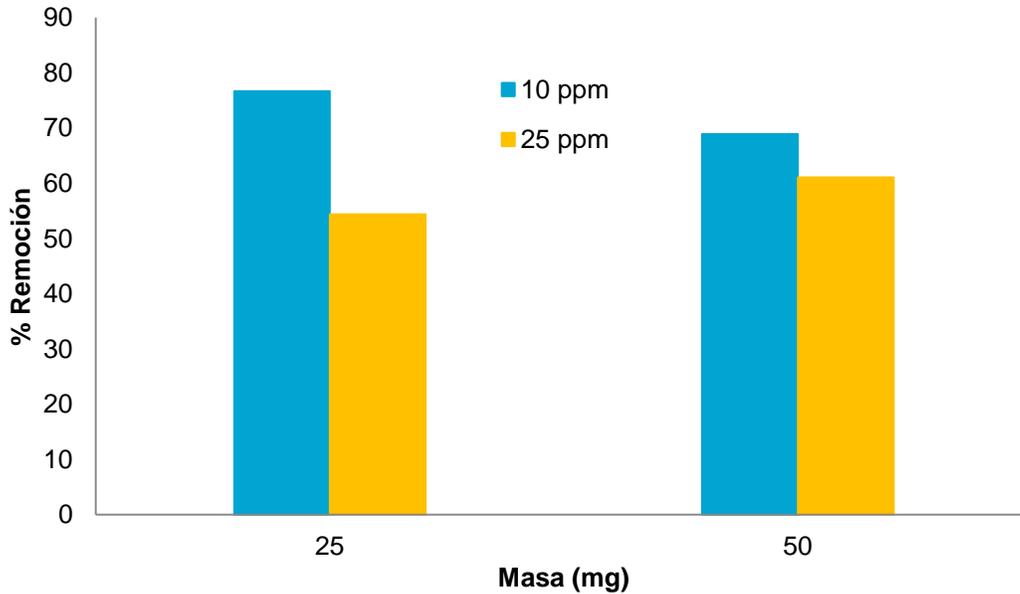


Figura 24. Comparación del porcentaje de remoción en relación a la masa

#### 4.8 Análisis Factorial del Bioadsorbente sin Modificación Química

Del mismo modo que en el anterior proceso, se realizó un análisis factorial con los resultados obtenidos de la remoción utilizando el adsorbente sin modificación química, utilizando las variables antes mencionadas (Cuadro 7).

Se observa que el modelo propuesto es eficiente ( $0.000 < \alpha = 0.05$ ) ya que coincide con lo propuesto por Sánchez (2018), de modo que el diseño planteado involucra las variables requeridas para observar la capacidad de adsorción de  $\text{Cr}^{+6}$  usando la cáscara de cachichín sin modificación química. Cabe destacar que, en el análisis con modificación química, la única variable sin interacción que no presentó un efecto en la adsorción fue la concentración, mientras que en este análisis la masa y el tiempo son las que no intervienen en este proceso. Por otro lado, se tienen la  $R^2 = 0.695$  y  $R^2$  ajustado = 0.546 las cuales son similares a las del modelo con modificación química ( $R^2 = 0.714$   $R^2$  ajustada = 0.566)

Cuadro 7. Análisis Factorial utilizando adsorbente sin modificación química

Origen	F	p	$\alpha$
Modelo corregido	4.665	.000	0.05
Concentración	18.000	.000	0.05
TP	6.054	.016	0.05
Masa	.194	.661	0.05
Tiempo	1.904	.118	0.05
Concentración * TP	10.212	.002	0.05
Concentración * Masa	16.036	.000	0.05
Concentración * Tiempo	8.033	.000	0.05
TP * Masa	5.577	.021	0.05
TP * Tiempo	2.958	.025	0.05
Masa * Tiempo	3.619	.009	0.05
Concentración * TP * Masa	3.019	.086	0.05
Concentración * TP * Tiempo	3.742	.008	0.05
Concentración * Masa * Tiempo	2.934	.026	0.05
TP * Masa * Tiempo	4.459	.003	0.05
Concentración * TP * Masa * Tiempo	3.064	.021	0.05

$$R^2 = 0.695 \quad R^2 \text{ ajustado} = 0.546$$

TP= Tamaño de Partícula

En este modelo se muestra que, de las cuatro variables utilizadas sin interacción, solo dos tienen un efecto en la adsorción (concentración y tamaño de partícula) ya que las otras están por arriba del valor de significancia ( $\alpha=0.05$ ), sin embargo, al realizar las combinaciones, se puede observar que, si muestran un efecto en la adsorción, únicamente la combinación Concentración, Tamaño de Partícula y Masa no representan efecto en la remoción de este metal.

#### 4.9 Comparación de Medias de la Prueba de Duncan

Se realizó una prueba Duncan con los tiempos de contacto al emplear el adsorbente sin modificación química (Cuadro 8).

Cuadro 8. Prueba Post-Hoc Duncan en función de la variable de Tiempo de contacto

Tiempo	N	Subconjunto	
		1	2
1.00	24	73.2852	
60.00	24	75.0096	75.0096
30.00	24	77.8938	77.8938
15.00	24	79.2341	79.2341
45.00	24		81.7672
Sig.		.120	.076

$\alpha=.05$

El subconjunto uno se formó por los tiempos 1, 15, 30, 60 min y el segundo fue 15, 30, 45 y 60, los promedios de remoción son estadísticamente iguales a excepción de 45 min y del tiempo de 1 min, que presentan diferencias estadísticas, es por lo anterior la obtención de dos subconjuntos.

Al comparar el orden con el Cuadro 7, se observa que el primer valor es 15 min con promedio de remoción del 77%, mientras que en el Cuadro 9 fue un minuto con remoción del 73%, por otro lado, los últimos valores en los dos cuadros fue 30 min con remoción de 86% (Cuadro 7) y 45 min con 81% (Cuadro 9). Se muestra que los promedios de remoción más altos pertenecen al adsorbente con modificación química.

## CAPÍTULO. V. CONCLUSIONES

A partir del experimento, se observa que la cáscara de cachichín modificada químicamente con NaOH puede remover hasta un 86% del contaminante propuesto en un tiempo de contacto de 60 min. Sin embargo, al no aplicarle la modificación llega a remover 81% en un tiempo de 45 min. Además las variables propuestas explican idóneamente el proceso de adsorción.

Al utilizar la cáscara de cachichín como material adsorbente con modificación química en tamaños de partícula de 0.297 y 0.595 mm ante la concentración de 25 ppm se llegó a remover arriba del 77% en ambos tamaños de partícula. En el caso de la cáscara de cachichín sin modificación química removi6 más del 88% con el tamaño de partícula 0.297.

En el caso de la remoci6n en funci6n de la masa con modificaci6n químic a ante 25 ppm lleg6 a remover arriba del 80 al emplear 25 y 50 mg de la cáscara de cachichín.

La mayor remoci6n se present6 al utilizar la concentraci6n de 25 ppm en todas las variables.

Dentro de las variables utilizadas, el tiempo de contacto juega un papel fundamental en el proceso de remoci6n del  $\text{Cr}^{+6}$ .

De este modo se puede plantear que el uso de cáscara de cachichín, como residuo de cosechas, es una alternativa para desarrollar un adsorbente que presenta una remoci6n favorable de acuerdo a la capacidad de adsorción del  $\text{Cr}^{+6}$ , mostrando un potencial importante para seguir investigándolo y su posible aplicaci6n en el tratamiento de metales pesados en aguas contaminadas.

## CAPÍTULO VI. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, I.; Sandoval, P.; Bautista, D.; Hernández, N.; Cárdenas, J. and Martínez, V. (2012). Bioadsorción de cromo (VI) por la cáscara de mamey (*Mammea americana* L.). *Avances En Ciencias E Ingeniería*, 3(2): 1–9.
- Acosta, I.; López, V.; Coronado, E.; Cárdenas, J. F. y Martínez, V. M. (2010). Remoción de Cromo (VI) en Solución Acuosa por la Biomasa de la Cáscara de Tamarindo (*Tamarindus indica*). *Biotechnología*, 15(3), 11-23.
- Ahmad, M. K.; Islam, S.; Rahman, M. S.; Haque, M. R. and Islam, M. M. (2010). Heavy Metals in Water. Sediment and Some Fishes of Buriganga River, Bangladesh. *International Journal of Environmental Resarch*, 4(2): 321–332.
- Albis, A.; Cajar, L. V. y Domínguez, M. I. (2015). Análisis cinético de la Adsorción de Cr (VI) en soluciones acuosas a concentraciones de 10-20 mg/L con el uso de cáscara de yuca amargain (*Manihot esculenta*). *Prospectiva*, 13(6): 64–71.
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2003). Diagnostico Local con Participación Social: Localidad de Tunjuelito. Versión Preliminar. Bogotá.
- Alexeeff, G. V.; Satin, K.; Painter, P.; Zeise, L.; Popejoy, C. and Murchison, G. (1989). Chromium carcinogenicity: California strategies. *Science of the Total Environment*, 86(1-2): 159-168.
- Ali, A.; Saeed, K. and Mabood, F. (2016). Removal of chromium (VI) from aqueous medium using chemically modified banana peels as efficient low-cost adsorbent. *Alexandria Engineering Journal*, 55(3): 2933-2942.
- Aretxaga, A.; Romero, S.; Sarra, M. and Vicent, T. (2001). Adsorption step in the biological degradation of a textile dye. *Biotechnology progress*, 17(4): 664-668.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). (2008). Cromo (Chromium) CAS # 7440-47-3. Consultado el 28 de septiembre, 2017. Obtenido [http://www.ladep.es/ficheros/documentos/Cromo\\_TOXFAQs.pdf](http://www.ladep.es/ficheros/documentos/Cromo_TOXFAQs.pdf)
- ATSDR. (2000). Resumen de Salud Pública, Cromo CAS#: 7440-47-3. Consultado el 28 de septiembre, 2017. Obtenido de <http://www.davidborowski.com/work/ATSDR%20ToxFAQs%20and%20PHS%202007/Data/Spanish/PHS%20for%20CROMO.pdf>
- ATSDR. (2006). Chromium Toxicity. Case Studies in Environmental Medicine. Course: SS3048 U.S.

- ATSDR. (2009). Módulo I, Introducción a la toxicología. Consultado el 11 de Marzo, 2019. Obtenido de [https://www.atsdr.cdc.gov/es/training/toxicology\\_curriculum/modules/1/es\\_lecturenotes.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/training/toxicology_curriculum/modules/1/es_lecturenotes.html)
- ATSDR. (2016). Resúmenes de Salud Pública-Cromo. Consultado el 28 de Septiembre, 2017. Obtenido de [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs7.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs7.html)
- Attarian, S. (2011). Original articles on axonal neuropathy in 2010. *Revue neurologique*, 167(12), 951-954.
- Badr, E. A.; Agrama, A. A. and Badr, S. A. (2011). Heavy metals in drinking water and human health, *Egypt. Nutr. Food Sci.* 41 (3): 210–217.
- Balakrishnan R.; Satish K.; Rani M.; Srikanth M.; Boobalan G. and Reddy A. (2013) An evaluation of the protective role of  $\alpha$ -tocopherol of free radical induced hepatotoxicity and nephrotoxicity due to chromium in rats. *Indian J Pharmacol*, 45(5): 490-495.
- Barbier O.; Jacquillet G.; Tauc M., Cougnon M. and Poujeol P. (2005) Effect of heavy metals on, and handling by, the kidney. *Nephron Physiol* 99: 105-110.
- Barkat, M.; Nibou, D.; Chegrouche, S. and Mellah, A. (2009). Kinetic and thermodynamics studies of chromium (VI) ions adsorption onto activated carbon from aqueous solutions. *Chemical Engineering and processing*, (48): 38-47.
- Barrera D.; Maldonado P.; Medina-Campos O.; Hernández-Pando R.; Ibarra-Rubio M. and Pedraza-Chaverrí J. (2003)  $\text{HO}^{-1}$  induction attenuates renal damage and oxidative stress induced by  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ . *Free Radic Biol Med*, 34: 1390-1398.
- Bartholomäus R.; Irwin J.; Shi L.; Smith S.; Levin A. and Lay P. (2013) Isolation, characterization, and nuclease activity of biologically relevant chromium(V) complexes with monosaccharides and model diols. Likely intermediates in chromium-induced cancers. *Inorg Chem* 52(8): 4282-4292.
- Bermúdez, M. (2010). Contaminación y turismo sostenible. consultado el 28 de septiembre del 2017, Obtenido de <http://galeon.com/mauriciobermudez/contaminacion.pdf>
- Berry J.; Hourdry J.; Galle P. and Lagrue G. (1978) Chromium concentration by proximal renal tubule cells: an ultrastructural, microanalytical and cytochemical study. *J Histochem Cytochem*, 26: 651-657.
- Bishnoi, N.; Chugh, L. and Sawhney, S. (1993). Effect of chromium on photosynthesis, respiration and nitrogen fixation in pea (*Pisum sativum* L.) seedlings. *Journal of plant physiology*, 142(1): 25-30.

- Boşgelmez I.; Söylemezoğlu T. and Güvendik G. (2008) The protective and antidotal effects of taurine on hexavalent chromium-induced oxidative stress in mice liver tissue. *Biol Trace Elem Res*, 125(1): 46-58.
- Bradford, A. (2015). Pollution Facts and amp; Types of Pollution. Retrieved October 31, 2017. Retrieved from <http://www.livescience.com/22728-pollution-facts.html>
- Cañizares-Villanueva. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 42(3): 131.
- Castro Díaz, J. (2009). 60 Mil Toneladas De Residuos Aún Nos Envenenan. La Jornada Ecológica. 1-19. Consultado el 28 de septiembre del 2017, Obtenido de <http://www.jornada.unam.mx/2009/02/02/eco-c.html>
- Castro Pastor, B. (2014). Uso de la cáscara de banano (*Musa paradisiaca*) maduro deshidratada (seca) como proceso de bioadsorción para la retención de metales pesados, plomo y cromo en aguas contaminadas. Tesis de maestría. Universidad de Guayaquil. Ecuador. 111 pág.
- CEMDA (Centro Mexicano de Derecho Ambiental). (2006). El agua en México: lo que todas y todos debemos saber. FEA Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C, CEMDA Centro Mexicano de Derecho Ambiental, A.C. México. 91 pág.
- Cervantes, C. y Moreno-Sánchez, R. (1999). Contaminación ambiental por metales pesados: impacto en los seres vivos. A.G.T. Editor, S. A. México. p. 157
- Céspedes, I.J. (1994). Cromo. En: Córdoba PD. Toxicología. 3ª ed. pp 228-234.
- Chávez P. (2010). Descripción de la nocividad del cromo proveniente de la industria curtiembre y de las posibles formas de removerlo. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 9(17): 41-49.
- Cobos, O.; García, L. y Londoño, J. (2009). Estudio de la biosorción de cromo con hoja de café. *Ingeniería e Investigacion*, 29(2): 59-64.
- Colombia. Ministerio del Trabajo y Seguridad Social. (1997). Enfermedades profesionales: protocolos para su diagnóstico.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2011). Agua en el mundo. En Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Estadísticas del agua en México. 2011ed., México. 113–126 pág.
- Cuellar, O. (2015). Tratamientos para la remoción de Cromo (VI) presente en aguas residuales. *Revista Nova*, 1(1): 66-73.

- Dartsch P.; Hildenbrand S.; Kimmel R. and Schmahl F. (1998) Investigations on the nephrotoxicity and hepatotoxicity of trivalent and hexavalent chromium compounds. *Int Arch Occup Environ Health*, 71: 40-45.
- de Oliveira, L.; Ma, L.; Santos, J.; Guilherme, L. and Lessl, J. (2014). Effects of arsenate, chromate, and sulfate on arsenic and chromium uptake and translocation by arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. *Environmental pollution*, 184: 187-192.
- Delgadillo-López, A.; González-Ramírez, C.; Prieto-García, F.; Villagómez-Ibarra, J. y Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(2): 597-612.
- Díaz-Mayans J.; Laborda R. and Núñez A. (1986) Hexavalent chromium effects on motor activity and some metabolic aspects of Wistar albino rats. *Comp Biochem Physiol C*, 83(1): 191-195.
- Dimas R. (2011). Estudio de la interacción de metales pesados (Pb, Cd, Zn y Cr) en solución, en el proceso de biosorción por tres tipos de biomasa. Tesis de maestría en ciencias. Universidad Autónoma de Nuevo León. México. 90 pág.
- DOF (Diaio Oficial de la Federacion) (2016) Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales NOM-001-ECOL.1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales: 4-5.
- Echarri, L. (2006). Contaminación del agua. Consultada el 2de octubre del 2017, Obtenido de [https://virtual.upaep.mx/bbcswebdav/institution/portales/ingenierias/bachilleratos/Contaminacion\\_del\\_Agua/Contaminacion\\_del\\_agua.pdf](https://virtual.upaep.mx/bbcswebdav/institution/portales/ingenierias/bachilleratos/Contaminacion_del_Agua/Contaminacion_del_agua.pdf)
- Eckenfelder, W. (2000). Industrial Water Pollution Control. McGraw-Hill Education, Ed.) (3rd ed.). China. 378 pág.
- Eeckhout, S. (2007). Mercury : a poisonous solution. *Science in School*, (7): 12–15.
- Eggs, N.; Salvarezza, S.; Azario, R.; Fernández, N. and García, M. (2012). Adsorción de cromo hexavalente en la cáscara de arroz modificada químicamente. *Avances En Ciencias E Ingeniería*, 3(3): 141–151.
- Eilbeck, W.; Mattock, G. (1987). Chemical processes in waste water treatment, Ed. Ellis Horwood Limited, Chichester New York, 331 pp
- Encinas, M. (2011). Medio ambiente y contaminación. Principios básicos. Consultado el 28 de septiembre, 2017. Obtenido de [http://www.diputados.gob.mx/documentos/consejo\\_editorial/09\\_medio\\_ambiente\\_ecologia.pdf](http://www.diputados.gob.mx/documentos/consejo_editorial/09_medio_ambiente_ecologia.pdf)

- EPA (Environmental Protection Agency). (2000). Estándares del Reglamento Nacional Primario de Agua Potable. Oficina de Agua. Consultado el 28 de septiembre, 2017. Obtenido de <http://water.epa.gov/drink/agua/estandares.cfm>
- EPA. (2015). Terminology Services. Terms and Acronyms Report. United States Environmental Protection Agency. Consultado el 28 de septiembre, 2017. Obtenido de [https://ofmpub.epa.gov/sor\\_internet/registry/termreg/searchandretrieve/termsandacronyms/search.do?matchCriteria=Contains&checkedTerm=on&checkedAcronym=on&search=Search&term=water pollution](https://ofmpub.epa.gov/sor_internet/registry/termreg/searchandretrieve/termsandacronyms/search.do?matchCriteria=Contains&checkedTerm=on&checkedAcronym=on&search=Search&term=water%20pollution)
- Evan A. and Dail W. (1974) The effects of sodium chromate on the proximal tubules of the rat kidney. Fine structural damage and lysozymuria. *Lab Invest*, 30: 704-715.
- Farooq, U.; Kozinski, J.; Khan, M. and Athar, M. (2010). Biosorption of heavy metal ions using wheat based biosorbents—a review of the recent literature. *Bioresource technology*, 101(14): 5043-5053.
- Fatima S.; Arivarasu N.; Banday A.; Yusufi A. and Mahmood R. (2005) Effect of potassium dichromate on renal brush border membrane enzymes and phosphate transport in rats. *Hum Exp Toxicol* 24(12): 631-638.
- Faull, J. and Gupta, V. (2001). Selective Guest– Host Association on Self-Assembled Monolayers of Calix [4] resorcinarene. *Langmuir*, 17(5): 1470-1476.
- Fonseca R. (2016) ¿Qué pasó con Química Central?, Consultado el 18 de Febrero, 2019, obtenido de <https://www.am.com.mx/2016/04/16/san-francisco-del-rincon/opinion/que-paso-con-quimica-central-277299>
- Franchini I.; Mutti A.; Cavatorta A.; Corradi A.; Cosi A.; Olivetti G and Borghetti A (1978) Nephrotoxicity of chromium. Remarks on an experimental and epidemiological investigation. *Contrib Nephrol*, 10: 98-110.
- Fu, F. and Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. *Journal of environmental management*, 92(3): 407-418.
- Galindo, L.; Sotto, M. y Artunduaga, O. (2015). Remoción de Cromo Hexavalente utilizando cáscara de *Moringa Oleifera* como bio-adsorbente. *Revista Nova*, 1(1): 74-87.
- Garces J.; Coavas R., y Tejada T. (2012). Evaluación de la capacidad de adsorción en la cáscara de naranja (*Citrus sinensis*) modificada con quitosano para la remoción de Cr (VI) en aguas residuales. Tesis Doctoral, Universidad de Cartagena.

- García V.; Yipmantin O.; Guzmán L.; Pumachagua H. y Maldonado G. (2011). Estudio de la cinética de biosorción de iones plomo en pectina reticulada proveniente de cáscaras de cítricos. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 77(3): 173-181.
- García, J. (2017). Abandonan desechos de la Química Central. Periódico a.m. Consultado el 28 de septiembre, 2017. Obtenido de <https://www.am.com.mx/2017/05/08/leon/local/abandonan-desechos-de-la-quimica-central-356270>
- Gazzola, D.; Echave, D. y Gazzola, J. (2014). Venenos en el Agua, Cromo. 1st ed. Argentina: GT Laboratorio, pp.1-12.
- Gowd S. and Govil, P. (2008). Distribution of heavy metals in surface water of Ranipet industrial area in Tamil Nadu, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136(1–3): 197–207.
- Griswold, W., and Martin, S. (2009). Human Health Effects of Heavy Metals. *Environmental Science and Technology*, (15): 1–6.
- Gunsé, F. (1987). Efectos del cromo sobre la nutrición y relaciones hídricas de *Phaseolus vulgaris*. Tesis de doctorado en ciencias. Universidad Autónoma de Barcelona, España: 209 pág.
- Gupta, S. and Babu, B. (2009). Removal of toxic metal Cr(VI) from aqueous solutions using sawdust as adsorbent: Equilibrium, kinetics and regeneration studies. *Chemical Engineering Journal*, 150(2–3): 352–365.
- Gutiérrez, B. (1994). Icacinaceae. En: Sosa y Gómez-Pompa (Eds.). Fascículo No. 80. Flora de Veracruz. Instituto de Ecología, A.C. y University of California, Xalapa, Veracruz, México
- Hawley, E.; Deeb, R.; Kavanaugh, M. and Jacobs, J.(2004). Treatment technologies for chromium (VI). *Chromium (VI) handbook*, 275-309.
- Huamán, G. and Torem. (2008). Bioadsorción de metales pesados contenidos en efluentes utilizando biomasa orgánica, en Departamento de Ciencia de los Materiales y Metalurgia, Pontificia. Universidad Católica de Rio de Janeiro
- Huisman, J.; Schouten, G. and Schultz, C. (2006). Biologically produced sulphide for purification of process streams, effluent treatment and recovery of metals in the metal and mining industry. *Hydrometallurgy* 83: 106-113
- Huk, O. L.; Catelas, I.; Mwale, F.; Antoniou, J.; Zukor, D. and Petit, A. (2004). Induction of apoptosis and necrosis by metal ions in vitro. *The Journal of arthroplasty*, 19(8): 84-87.
- Hussein, H.; Ibrahim, S. F.; Kandeel, K. and Moawad, H. (2004). Biosorption of heavy metals from waste water using *Pseudomonas sp.* *Electronic journal of Biotechnology*, 7(1): 30-37.

- IARC (International Agency for Research on Cancer). (2012). Agents Classified by the IARC Monographs, Retrieved September 28, 2017, Retrieved. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Igwe, J. and Abia, A. (2006). Sorption kinetics and intraparticulate diffusivity of As (III) bioremediation from aqueous solution, using modified and unmodified coconut fiber. *Ecletica Quimica*, 31(3): 23-29.
- Ikeda T.; Takahashi K.; Kabata T.; Sakagoshi D.; Tomita K. and Yamada M. (2010) Polyneuropathy caused by cobalt-chromium metallosis after total hip replacement. *Muscle Nerve* 42(1): 140-143.
- INC (Instituto Nacional del Cáncer). (2015). Compuestos de cromo hexavalente. Consultado el 28 de septiembre, 2017. Obtenido de <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/sustancias/cromo>
- IRIS (Risk Information System, EPA). (1998) Toxicological review of Hexavalent Chromium. In support of Summary Information on the Integrated
- Irwin, R.; Van M.; Stevens, L.; Seese, M. and Basham, W. (1997). Environmental Contaminants Encyclopedia Chromium (VI) (Hexavalent Chromium) Entry. National Park Service Water.
- Izquierdo, M. (2010). Eliminación de metales pesados en aguas mediante bioadsorción, evolución de materiales y modelación del proceso. Tesis de doctorado. Universidad de Valencia. México. 329 pág.
- Kadirvelu, K.; Faur-Brasquet, C. y Le C. (2000). Removal of Pb (II), Cu (II) and Ni (II)-by adsorption onto activated carbon cloths. *Langmuir*, 16, 8404-8409.
- Karim, Z. (2011). Risk Assessment of Dissolved Trace Metals in Drinking Water of Karachi, Pakistan. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 86, 676–678.
- Kim E and Na K. (1991) Nephrotoxicity of sodium dichromate depending on the route of administration. *Arch Toxicol*, 65(7): 537-541.
- Kollmeier, H.; Seemann, J.; Müller, K.; Rothe, G.; Wittig, P. and Schejbal, V. (1987). Increased chromium and nickel content in lung tissue and bronchial carcinoma. *American journal of industrial medicine*, 11(6): 659-669.
- Kollmeier, H.; Seemann, J.; Rothe, G.; Müller, K. and Wittig, P. (1990). Age, sex, and region adjusted concentrations of chromium and nickel in lung tissue. *Occupational and Environmental Medicine*, 47(10): 682-687.
- Lascurain R. (2012). Estudio integral de la fruta silvestre comestible *Oecopetalum mexicanum* Greenm and CH Thomps., de la Sierra de Misantla, Veracruz. Tesis de maestría en agroecología, Universidad Internacional de Andalucía. México

- Lauwerys R. (2007) Toxicologie Industrielle et intoxications professionnelles. 5th ed. Paris: Masson. pp 240-254.
- Lemus, J. (2016). RÍOS TÓXICOS. Consultado el 20 de Febrero, 2019, obtenido de <https://www.reporteindigo.com/reporte/rios-toxicos/>
- Mangabeira, P.; Ferreira, A.; de Almeida, A.; Fernandes, V.; Lucena, E.; Souza, V.; dos Santos J.; Oliveira, A.; Grenier-Loustalot, M. and Barbier, F. (2011). Compartmentalization and ultrastructural alterations induced by chromium in aquatic macrophytes. *Biometals* 24(6): 1017-1026.
- Marino, B. R. (2006). Evaluación de las tecnologías de tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con Cromo. Tesis de maestría en ciencias. Universidad Politécnica de Catalunya. España. 135 pág.
- Marrett, L.; Hartge, P. and Meigs, J. (1986). Bladder cancer and occupational exposure to leather. *Occupational and Environmental Medicine*, 43(2): 96-100.
- McGrath, S. and Smith, S. (1990) Chromium and nickel. In: Heavy Metals in Soils (Alloway, B.J., Ed.), pp. 125-150. Wiley, New York.
- Meléndez, V. (2018). Niegan ampliación de relleno sanitario. Consultado el 18 de Febrero, 2019, obtenido de [http://www.ntrguadalajara.com/post.php?id\\_nota=100662](http://www.ntrguadalajara.com/post.php?id_nota=100662)
- Méndez, E. (2017). Monstruo tóxico en Tultitlán, Edomex será un parque. Reforma, La Nacionales, Consultado el 23 de Octubre del 2017, obtenido de <http://www.excelsior.com.mx/2012/07/09/nacional/846535>
- Mayer, T. and Jarrell, W. (2000). Phosphorus sorption during iron (II) oxidation in the presence of dissolved silica. *Water Research*, 34(16): 3949-3956.
- Ministerio de Salud. (2010). Estándares de calidad ambiental de agua. Perú. Consultado el 23 de Octubre del 2017, obtenido de [http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes\\_tecnicos/GRUPO DE USO 3.pdf](http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes_tecnicos/GRUPO_DE_USO_3.pdf)
- Moore, J. and Ramamoorthy, S. (1984). Heavy Metals in Natural Waters. Springer-Verlag Ed. USA.:pp 278.
- Moussavi, G. and Barikbin, B. (2010). Biosorption of chromium (VI) from industrial wastewater onto pistachio hull waste biomass. *Chemical Engineering Journal*, 162(3): 893-900.
- Nemerow, N. and Dasgupta, A. (1998). Tratamiento de vertidos industriales peligrosos. Ed. Dias de Santos. Madrid, 822 pp

- Orozco, H. y Toro, B. (2007). Determinación de la concentración letal media (CL<sub>48</sub><sup>50</sup>) del cromo y el cobre por medio de bioensayos de toxicidad acuática sobre *Daphnia pulex*. Tesis de Licenciatura en Ciencias. Universidad de La Salle, Colombia: 1-164.
- Pan T.; Wang P.; Chen C.; Fang J. and Sintupisut N. (2012) Functional proteomics reveals hepatotoxicity and the molecular mechanisms of different forms of chromium delivered by skin administration. *Proteomics*, 12(3): 477-489.
- Pedraza-Chaverrí J.; Moreno-Muñiz S; Cruz C.; Hernández-Pando R.; Larriva-Sahd J. and Tapia E. (1995) Urinary angiotensin I-converting enzyme activity is increased in experimental acute renal failure. *Clin Invest Med*, 18: 424-434.
- Parveen K.; Khan M.; Siddiqui W. (2009) Pycnogenol prevents potassium dichromate K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>-induced oxidative damage and nephrotoxicity in rats. *Chem Biol Interact* 181(3): 343-350.
- Pérez, S.; Calzado, L.; Cascaret, C. and Tur, N. (2014). Adsorción de Cr (VI) por cocos *Nucífera L.* en residuales de fibrocemento en Santiago de Cuba. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 16(1): 9–18.
- Pineda C.; Muñoz N.; Rosa A. y Urbina, E (2.011). Aplicación de la cáscara de la nuez pecanera (*Carya illinoensis*) en la remoción de cromo, a partir de soluciones acuosas. *Revista Cubana de Química*, 13(6): 48–53.
- Pinzón-Bedoya, M. y Villamizar, L. (2009). Modelamiento de la cinética de bioadsorción de Cr (III) usando cáscara de naranja. *Dyna*, 76(160), 95-106.
- Plaper A.; Jenko-Brinovec S.; Premzl A.; Kos J. and Raspor P. (2002) Genotoxicity of trivalent chromium in bacterial cells. Possible effects on DNA topology. *Chem Res Toxicol*, 15: 943-949.
- Quintana, M.; Espinoza, P.; Frescas, A.y Pinedo, Á. (2015). La importancia de la evaluación de la calidad del agua en la Laguna de Bustillos, Chihuahua, México. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, 6(13): 187-203
- Rangabhashiyam, S. and Selvaraju, N. (2015). Adsorptive remediation of hexavalent chromium from synthetic wastewater by a natural and ZnCl<sub>2</sub> activated *Sterculia guttata* shell. *Journal of Molecular Liquids*, 207: 39-49.
- Rodríguez, A.; Pacheco, N.; Cárdenas, J.; Tovar, J.; Martínez, V. y Acosta, I. (2017). Bioadsorción de cromo (VI) en solución acuosa por la biomasa de amaranto (*Amaranthus caudatu*). *Avances En Ciencias E Ingeniería*, 8(2): 11–20.
- Rosales, L. (2014). Estudio de la remoción de Cr (VI) presente en soluciones acuosas empleando un silicato natural y modificado. Tesis de maestría en ciencias. Universidad Autónoma del Estado de México. México. 105 pág.

- Sala, E.; Granhen, C. and Tavares, M. 2005. Biosorption Chromium (III) by *Sargassum sp.* *Biomass. Electron. J. Biotechnol.* 5:1-7.
- Sanchez, L. (2018). Adsorción de Cr<sup>+6</sup> en partículas a bases de cáscara de *Musa balbisina*. Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Mexico 1-67 pp
- SEMARNAT, (2010). Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados (PNRSC) [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/387622/Programa\\_Nacional\\_Remediacion\\_Sitios\\_Contaminados.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/387622/Programa_Nacional_Remediacion_Sitios_Contaminados.pdf)
- Simeonov, V.; Stratis, J.; Samara, C.; Zachariadis, G.; Voutsas, D., Anthemidis, A.; Sofoniou, M. and Kouimtzis, T. (2003). Assessment of the surface water quality in Northern Greece. *Water Res.* 37, 4119–4124
- Singha, B. and Das, S. (2011). Biosorption of Cr (VI) ions from aqueous solutions: kinetics, equilibrium, thermodynamics and desorption studies. *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*, 84(1): 221-232.
- Slade P.; Hailer M.; Martin B. and Sugden K. (2005) Guanine-specific oxidation of double-stranded DNA by Cr (VI) and ascorbic acid forms spiroiminodihydroantoin and 8-oxo-2'-deoxyguanosine. *Chem Res Toxicol*, 18: 1140-1149.
- Soudani N.; Bouaziz H.; Sefi M.; Chtourou Y.; Boudawara T. and Zeghal N. (2013) Toxic effects of chromium (VI) by maternal ingestion on liver function of female rats and their suckling pups. *Environ Toxicol*, 28(1): 11-20.
- Sridhar, B.; Han, F.; Diehl, S.; Monts, D. and Su, Y. (2011). Effect of phytoaccumulation of arsenic and chromium on structural and ultrastructural changes of brake fern (*Pteris vittata*). *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 23(4): 285-293.
- Tchounwou, P.; Yedjou, C.; Patlolla, A. and Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. *In Molecular, clinical and environmental toxicology*. (101):1–30.
- Tejada T.; Villabona O. y Jiménez V. (2017). Remoción de cromo hexavalente sobre residuos de cacao pretratados químicamente. *Revista UDCA Actualidad y Divulgación Científica*, 20(1): 139-147.
- Velázquez, J. (2015). Propuesta de un sistema de biofiltración de cromo hexavalente en agua, utilizando olote de maíz. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México. México. 112 pág.
- WHO (World Health Organization). (1988). Chromium. Environmental Health Criteria 61. <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc61.htm> World Health Organization.

- Wittmann, G. (1981). Toxic Metals. In: Metal Pollution in the Aquatic Environment, Chapt B. Förstner, U. and Wittman, G. (Eds).Springer-Verlag. USA. Berlin, pp 3-70.
- WWAP, (World Water Assessment Programme, UNESCO). (2009). Water in a changing world. The United Nations World Water Development Report, 3.
- Yarto, M. (2009). Los efectos de la contaminación: el caso de las sustancias tóxicas persistentes. Consultado el 26 de Agosto del 2018. Obtenido de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/467/yarto.html>
- Zhao, B.; Maeda, M.; Zhang, J.; Zhu, A. and Ozaki, Y. (2006). Accumulation and chemical fractionation of heavy metals in andisols after a different, 6 year fertilization management. *Environmental science and pollution research*, 13(2): 90-97.