



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

DISEÑO DE UN ADSORBENTE A BASE DE BAMBÚ PARA LA REMOCIÓN DE Cr⁺⁶ EN AGUAS CONTAMINADAS

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO AMBIENTAL

P R E S E N T A

DELSY YANNETH MARTÍNEZ JIMÉNEZ

DIRECTOR:

M.C. ALAN ANTONIO RICO BARRAGÁN

CODIRECTOR:

M.Sc. ELIZABETH SALAZAR HERNÁNDEZ

MISANTLA, VERACRUZ

JULIO, 2019

Hoja de Autorización



**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:

DELSY YANNETH MARTÍNEZ JIMÉNEZ

pasante de la carrera de INGENIERÍA AMBIENTAL con No. de Control 142T0418 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:

**“DISEÑO DE UN ADSORBENTE A BASE DE BAMBÚ PARA LA REMOCIÓN
DE Cr⁺⁶ EN AGUAS CONTAMINADAS”**

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 FLAXALO ESPINOZA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES



Archivo.

La tesis titulada: **“DISEÑO DE UN ADSORBENTE A BASE DE BAMBÚ PARA LA REMOCIÓN DE Cr⁺⁶ EN AGUAS CONTAMINADAS”**

Fue realizada por **DELSY YANNETH MARTÍNEZ JIMÉNEZ** 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 de Tesis M.Sc. Elizabeth Salazar Hernández _____

Asesor M.C Yovani López Gozález _____

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

Doy gracias a Dios por la vida que me ha permitido tener hasta este momento, por las alegrías, tristezas, enfermedades y el gozo que me ha brindado en cada día, por la familia donde nací, por mis amigos, maestros y compañeros que el Señor ha puesto en mi camino.

A mis padres les debo la vida entera, gracias por la valentía de salir cada día adelante para brindarnos una educación a mí y a mis hermanos, por enseñarnos los valores y principios, por enseñarme a siempre ser una familia unida a pesar de las circunstancias, por el gran esfuerzo reflejado en su trabajos para lograr que yo llegara hasta este ciclo de mi vida, gracias por el amor y dedicación para conmigo, gracias por esos sacrificios que han hecho por mí, porque de ellos y para ellos son mis logros y le pido a Dios que me alcance la vida para agradecerles todo

A mi abuela Elena, mi tía Maricela y Cynthia, a mis demás tías/os y primos/as, por su apoyo incondicional en cada una de las etapas que he logrado, porque siempre estuvieron acompañándome, aconsejándome, gracias por su amor sincero, por confiar en mí y animarme a ser mejor cada día, fueron, son y serán siempre un gran apoyo.

Al grupo de Renovación de Nuestra Señora de la Asunción, por sus muestras de cariño y hermandad, a cada uno de ellos por convertirse en mí segunda familia, por sus oraciones, los ánimos, agradezco que el Señor me permitiera conocerlos, por enseñarme a servir aun en las dificultades.

A mis amigos en especial a Winik, Neri, Elizabeth, Rocío, Mayra y María, conocidos y maestros, doy gracias por su apoyo en los momentos difíciles, por sus enseñanzas y su amistad sincera, por los momentos de risas que hemos vivido juntos, porque cada día aprendí mucho de cada uno.

A mi director de tesis Alan le doy mi sincero agradecimiento por el tiempo dedicado, la paciencia, dedicación, ánimos, enojos, por compartir con sus asesorados momentos de risas y experiencias personales, por brindarme todo su apoyo posible para la realización de esta tesis.

CONTENIDO

	Página
Índice de Cuadros	
Índice de Figuras	
Resumen	
Summary	
Capítulo I. Generalidades	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivo General	3
1.3 Objetivos Específicos	3
1.4. Hipótesis	3
Capítulo II. Marco Teórico	4
2.1 Contaminación	4
2.1.1 Contaminación del agua	5
2.1.2 Contaminación por metales pesados	6
2.1.3 Contaminación por Cr en México	8
2.2 Impacto al ambiente	9
2.3 Toxicología Ambiental	12
2.4 Remoción de Metales Pesados	15
2.4.1 Filtración por membrana	16
2.4.2 Intercambio catiónico	16
2.4.3 Coagulación-Floculación	17
2.4.4 Electrocoagulación	18
2.4.5 Adsorción	19
2.4.6 Adsorción de Cr ⁺⁶ por materia orgánica	21
2.4.7 Bambú	23
2.5 Determinación de Metales Pesados	25
2.5.1 Espectrofotometría de masa con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)	25
2.5.2 Espectrofotometría de absorción atómica (AA)	26
2.5.3 Espectrofotometría de fluorescencia con rayos X (FRX)	26
2.5.4 Cromatografía iónica	27

2.5.5	Cromatografía de gases (GC)	27
2.5.6	Cromatografía de gases asociada a un espectrofotómetro de masas (CG-MS)	28
2.5.7	Espectrofotometría ultravioleta-visible (UV-VIS)	29
	Capítulo III. Materiales y Métodos	30
3.1	Preparación de la Materia Orgánica	30
3.2	Pretratamiento de la Materia Orgánica	30
3.3	Obtención de las Partículas	31
3.4	Diseño del Experimento	31
3.5	Hidrólisis Básica	32
3.6	Preparación de Soluciones y Determinación de Cr ⁺⁶	33
3.7	Evaluación de la Capacidad Adsorbente	34
3.8	Análisis Estadístico	35
	Capítulo IV. Resultados y Discusión	36
4.1	Caracterización del Adsorbente	36
4.2	Adsorción de Cr ⁺⁶ ante el Tratamiento sin Hidrólisis	37
4.2.1	Efecto del tamaño de partícula ante la remoción	37
4.2.2	Efecto del tiempo de contacto ante la remoción	39
4.2.3	Efecto de la concentración en equilibrio ante la concentración inicial	40
4.2.4	Efecto de la concentración inicial Cr ⁺⁶ ante la remoción	40
4.3	Análisis estadístico	42
4.4	Adsorción de Cr ⁺⁶ ante el tratamiento con Hidrólisis	43
4.4.1	Efecto tamaño de partícula ante la remoción con hidrólisis	43
4.4.2	Efecto tiempo de contacto ante la remoción con hidrólisis	44
	Capítulo V. Conclusiones	46
	Capítulo VI. Bibliografía	47

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1 Actividades y causas generadas por metales pesados	7
Cuadro 2 Límites permisibles para el cromo	15
Cuadro 3 Eliminación de humedad en la materia orgánica	36
Cuadro 4 Resultados del análisis factorial	42

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página	
Fig. 1	Distribución del bambú en el mundo	23
Fig. 2	Distribución del bambú en México	24
Fig. 3	Guadua aculeata en el ITSM	30
Fig. 4	Obtención de partículas de hoja de bambú	31
Fig. 5	Realización de ensayos	32
Fig. 6	Lectura de las repeticiones en el espectrofotómetro	32
Fig. 7	Modificación química del bambú	33
Fig. 8	Curva de calibrado a partir de concentraciones conocidas	34
Fig. 9	Tamaño de partícula obtenidos	37
Fig. 10	Adsorción de Cr^{+6} a concentración de 10 y 25 ppm	38
Fig. 11	Adsorción de Cr^{+6} ante el tiempo de contacto	39
Fig. 12	Concentración en equilibrio con relación a la concentración inicial	40
Fig. 13	Porcentaje de remoción en función a la concentración inicial	41
Fig. 14	Remoción de Cr^{+6} ante los tamaños de partícula	44
Fig. 15	Remoción de Cr^{+6} ante tiempo de contacto	45

RESUMEN

En México, los metales pesados más significativos por su toxicidad y disponibilidad son el Cromo (Cr), Plomo (Pb), Arsénico (As) y Mercurio (Hg), siendo los más utilizados en la industria y la minería, presentan afectaciones a la salud pública. Tal como lo manifiesta la International Agency for Research on Cancer por sus siglas en inglés "IARC", el estar expuesto a ciertas concentraciones de metales pesados, aumenta la probabilidad de contraer cáncer. Para el caso específico del Cr, la Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades, por sus siglas en inglés "ATSDR" (2011), determina que las principales estructuras de los estados de valencia son Cr^0 , Cr^{+3} y Cr^{+6} , siendo este último considerado el más tóxico para la salud y para el ambiente. En los métodos tradicionales para la remoción de metales pesados se emplean químicos que generan residuos con mayor toxicidad, además de presentar costos elevados, por el contrario se tienen estudios donde se observa que la materia orgánica posee un importante potencial de remoción del Cr^{+6} . Los estudios a base de partículas de hoja de bambú para la remoción del Cr^{+6} , se consideran hasta el momento como escasos o nulos, con lo que se abre un área de oportunidad. Dentro de esta investigación se evaluó la capacidad de adsorción que presentan las partículas de bambú frente al Cr^{+6} empleando dos tratamientos: uno es la modificación química de la biomasa con hidrólisis ácida y otro sin modificación química. En el experimento de adsorción se utilizó un volumen de 5 mL de las dos concentraciones (10 y 25 ppm) con tiempos de contacto de 1, 15, 30, 45 y 60 min, con 25 y 50 mg de masa del adsorbente, a temperatura ambiente, manteniendo un pH de 3 y una agitación constante, teniendo un total de 240 repeticiones. Para la determinación del porcentaje de remoción se tomó en cuenta la metodología descrita por Severiche y González (2013). Los datos muestran una remoción de Cr^{+6} que va desde un 60% hasta un 84%, observando que los más altos y bajos porcentajes de remoción se tuvieron ante el tratamiento sin la modificación química, siendo los mejores ante la concentración de 25 ppm, un tamaño de partícula 0.595 mm, con 25 mg de masa del adsorbente, en cuanto al porcentaje más bajo corresponde al experimento que presenta una concentración de 10 ppm, 25 mg de masa con un tamaño de 0.297 mm.

SUMMARY

In Mexico, the most significant heavy metals due to their toxicity and availability are Chromium (Cr), Lead (Pb), Arsenic (As) and Mercury (Hg), being the most used in industry and mining, they have effects on the public health. As stated by the International Agency for Research on Cancer (IARC), being exposed to certain concentrations of heavy metals increases the likelihood of cancer. For the specific case of Cr, the Agency for Toxic Substances and Disease Registry, for its acronym in English "ATSDR" (2011), determines that the main structures of the valence states are Cr^0 , Cr^{+3} and Cr^{+6} , being the latter considered the most toxic for health and for the environment. In the traditional methods for the removal of heavy metals, chemicals that generate waste with greater toxicity are used, in addition to presenting high costs, on the contrary there are studies where it is observed that the organic matter has an important potential for the removal of Cr^{+6} . Studies based on bamboo leaf particles for the removal of Cr^{+6} , are considered so far as little or no, which opens an area of opportunity. Within this research, the adsorption capacity of bamboo particles against Cr^{+6} was evaluated using two treatments: one is the chemical modification of the biomass with acid hydrolysis and the other without chemical modification. In the adsorption experiment, a volume of 5 mL of the two concentrations (10 and 25 ppm) was used with contact times of 1, 15, 30, 45 and 60 min, with 25 and 50 mg of adsorbent mass, at temperature environment, maintaining a pH of 3 and a constant agitation, having a total of 240 repetitions. To determine the percentage of removal, the methodology described by Severiche and González (2013) was taken into account. The data show a Cr^{+6} removal that goes from 60% to 84%, observing that the highest and lowest percentages of removal were before the treatment without the chemical modification, being the best ones before the concentration of 25 ppm, a particle size 0.595 mm, with 25 mg of adsorbent mass, in the lowest percentage corresponds to the experiment that has a concentration of 10 ppm, 25 mg of mass with a size of 0.297 mm.

Capítulo I. Generalidades

1.1 Introducción

La contaminación de agua por metales pesados es un problema desde hace miles de años por fuentes naturales, aunque teniendo afectaciones no significativas, en la actualidad la humanidad ha incrementado la velocidad de contaminación por las diversas actividades que realiza, algunas de las fuentes antropogénicas son: lixiviados en basureros clandestinos, minería y aguas residuales provenientes de industrias (Bravo-Inclán *et al.*, 2013).

En México, los metales pesados más significativos por su toxicidad y disponibilidad son el Cromo (Cr), Plomo (Pb), Arsénico (As) y Mercurio (Hg), siendo los anteriores los más utilizados en la industria y la minería, generando elevadas concentraciones de contaminantes en las zonas aledañas a la fuente de emisión (Pérez, 2001). Actualmente, estas actividades no pueden dejar de emplearse, ya que la economía mexicana sigue vinculada con el desarrollo de éstas (Romero y Corrales-Pérez, 2013; PND, 2013; Covarrubias *et al.*, 2017).

Las concentraciones elevadas de metales pesados han provocado afectaciones a la salud y al ambiente por medio de los procesos de bioacumulación o biomagnificación, teniendo como consecuencia diversos casos de cáncer y alteraciones genéticas (ATSDR, 2015; Reyes *et al.*, 2016; Londoño-Franco *et al.*, 2016). Dentro del Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018, se establece de suma importancia la implementación de tecnologías amigables con el ambiente para sanear las aguas residuales y además asegurar una calidad del agua, que garantice el consumo humano.

Algunas de las tecnologías recurridas para la remoción metales pesados se basan en métodos convencionales, tales como la filtración por membrana, intercambio

catiónico, coagulación-floculación y no convencionales, como la adsorción mediante carbón activado o compuestos químicos, ambos métodos requieren un importante costo de inversión y mantenimiento, así como la generación de residuos químicos (Caviedes *et al.*, 2015).

Dentro de los métodos no convencionales, la adsorción se considera como la adherencia a una superficie sólida o líquido, conteniendo las moléculas de la sustancia no deseada, este proceso depende de las características del material adsorbente y del adsorbato (Maron y Prutton, 2002; Tan y Xiao, 2008). En los últimos años, se han desarrollado investigaciones sobre la implementación de materiales adsorbentes a base de materia orgánica, lo anterior debido por los bajos costos de inversión y su eficiencia de remoción (Cañizares-Villanueva, 2000; Acosta *et al.*, 2012a; Tejeda-Tovar *et al.*, 2014).

En el territorio nacional de México los estados que cuentan con especies de Bambú son Chiapas, Oaxaca y Veracruz. El Bambú pertenece a la familia *Poaceae*, crece en lugares con climas cálidos, pueden llegar a medir hasta 25 metros de altura y tener diámetros de 10 a 20 centímetros, las cañas son huecas pero resistentes por lo cual son empleadas en algunos países en la fabricación de muebles, techos, artesanías y material de construcción, también es empleado como una especie ornamental la cual genera grandes cantidades de hojas que se vuelven residuos orgánicos (Cedaño y Irigoyen., 2011; Martínez., 2015; Salas, 2016).

La remoción de iones metálicos por Bambú en agua es una tecnología a bajo costo que sólo ha sido aplicada en humedales artificiales o carbón activado. Cabe señalar que los estudios a base de partículas de bambú para remoción de metales pesados son escasos o nulos, con lo que se abre un área de investigación. Esta investigación pretende determinar el grado en que las partículas a base de Bambú adsorben. Los resultados obtenidos en este experimento supondrían una importante contribución al campo dado que puede ser adoptada en cualquier cuerpo de agua de la región que presente concentraciones de los anteriores contaminantes.

1.2 Objetivo General

Determinar la capacidad de adsorción de la hoja de bambú frente a concentraciones Cr^{+6} presentes en el agua.

1.3 Objetivos Específicos

- Obtener partículas bioadsorbentes de Cr^{+6} a partir de la hoja de bambú
- Evaluar la capacidad de remoción Cr^{+6} , empleando la hoja de bambú
- Determinar las condiciones óptimas (tamaño de partícula, masa del bioadsorbente, tiempo de contacto y concentración Cr^{+6}) para la adsorción de Cr^{+6}

1.4 Hipótesis

Las partículas a base de bambú presentan la capacidad de adsorber Cr^{+6} a ciertas concentraciones.

Capítulo II. Marco Teórico

2.1 Contaminación

El término de contaminación se define como la introducción de elementos o sustancias tóxicas ajenas al ambiente, alterando a los ecosistemas y a la población. Actualmente, se tienen varios tipos de contaminación; recursos de agua, aire y suelo, en donde influyen diferentes factores que permiten evaluar el grado de contaminación, entre los que destacan el tipo de contaminante, la capacidad de amortiguamiento y la vulnerabilidad del ecosistema, su movilidad, la biodisponibilidad y la persistencia que presenta dicho contaminante (Atilo de la Orden *et al.*, 2010).

La NOM-001-ECOL-1996 (DOF, 1996) manifiesta que para que exista contaminación, se deben rebasar los límites máximos permisibles de la normatividad aplicable para cada tipo de sustancia, además clasifica a los contaminantes en básicos, patógenos o parásitos. Los primeros pueden ser removidos o estabilizados mediante tratamientos convencionales. Dentro de este grupo se encuentran grasas y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables y totales, demanda química de oxígeno, pH, temperatura y nitrógeno total. Mientras que los patógenos y parasitarios son aquéllos considerados como un riesgo para la salud humana, flora y fauna, considerándose a los coliformes totales y huevos de helminto (Peredo, 2010).

Sepúlveda (1999) expresa que el término contaminación ambiental se percibe como la presencia de contaminantes en ecosistemas donde no pertenecen, o en su caso se encuentran a concentraciones mayores de lo que deberían de ser. Algunas de las sustancias o elementos se degradan de forma natural, pero cuando éstos se encuentran en cantidades superiores a lo que se puede depurar, causan cambios en el ambiente en los que están presentes. Independiente de los diversos términos,

un contaminante manifiesta consecuencias negativas en el ambiente, siendo un factor de riesgo para la salud (Ramos, 1999; Maldonado, 2009; Bermúdez, 2010).

2.1.1 Contaminación del agua

El agua es el recurso más demandado, los cuerpos de agua son usados como depósitos de los residuos generados por alguna actividad antrópica, ocasionando efectos negativos en ellos; exhibiendo alteraciones en las propiedades físicas, químicas y biológicas (Bravo-Inclán *et al.*, 2013; Villalba *et al.*, 2012).

Collazo y Montaña (2012) expresan que la contaminación del agua puede ser natural o antropogénica:

- Natural: compuestos que se encuentran en la corteza terrestre alterando el equilibrio a lo largo del tiempo, como erupciones volcánicas, metales pesados, fenómenos naturales, animales que habitan en los cuerpos de agua y/o plantas tóxicas.
- Antropogénica: compuestos producidos por actividades de los seres humanos, por descargas excesivas de contaminantes.

Spiegel y Maystre (2001) definen a la contaminación del agua como el “Estado de impureza o suciedad en el agua”, mientras que Jarrin *et al.* (2006) consideran como una contaminación antropogénica del agua a las diversas descargas en zonas superficiales o subterráneas, lo anterior a partir de actividades mineras, curtidoras, residuos sólidos o de manejo especial, o peligrosos, actividades agroquímicas, domésticas y agropecuarias, afectando a la capacidad de amortiguamiento natural que presenta dicho cuerpo a la hora de realizar un tipo de depuración de los contaminantes.

De acuerdo con el Plan de Restauración de la Cuenca Anacostia de los Estados Unidos, por su acrónimo en inglés “AWRP” (2009), otro tipo de contaminación es la eutrofización, la cual presenta un crecimiento excesivo de algas o plantas no

deseadas, agotando el oxígeno, con lo que el cuerpo de agua pierde la capacidad de mantener vida de la fauna acuática.

El movimiento y dispersión de los contaminantes en el agua se desarrolla mediante escorrentías, lixiviación o erosión en el suelo (Novotny, 1999), tal es caso de algunos metales pesados que se encuentran en la corteza terrestre y debido a actividades humanas aceleran su aparición en aguas superficiales y subterráneas (Peredo, 2010).

Para el año de 1989, fue creada la Comisión Nacional del Agua “CONAGUA” teniendo como objetivo garantizar la seguridad de las cuencas hídricas nacionales y abastecimiento de este recurso, creando medidas de control y regulación, teniendo una de sus responsabilidades el tratamiento de las aguas residuales y la evaluación del grado de contaminación las mismas (CONAGUA, 2016).

2.1.2 Contaminación por metales pesados

Dentro del Diario Oficial de la Federación (DOF, 2002), la Secretaría de Salud manifiesta que un metal pesado es considerado como aquel elemento causante de negativos aún a bajas concentraciones, modificando la toxicidad de acuerdo a la dosis. Una recopilación realizada por Duffus (2002) menciona que diversos autores definen a los metales pesados por su densidad, número y peso atómico, propiedades químicas y por su toxicidad.

En México, los metales pesados como el Cr, Pb, As y Hg, son los más significativos debido a su toxicidad y disponibilidad (Covarrubias *et al.*, 2017). Además, son los más utilizados en la industria y minería, esta última, tal como lo menciona Romero y Corrales-Pérez (2013) es una de las actividades que aumentan el desarrollo económico en el país, pero genera elevadas cantidades de contaminantes.

De acuerdo al PND 2013-2018, el crecimiento económico y social del México sigue estrechamente vinculado a la generación de contaminantes, entre los que se encuentran los metales pesados (PND, 2013).

El uso de metales pesados durante los procesos industriales ha ocasionado la generación y emisión de concentraciones elevadas en ambientes acuáticos, en Cuadro 1 se presenta las diversas actividades y causas por las que generan metales pesados.

Cuadro 1. Actividades y causas generadas por metales pesados

Industria	Metales	Contaminación provocada
Minería de metales ferrosos	Cd, Cu, Cr, CO, Zn	Drenaje ácido de mina, deslaves, escombros de productos o subproductos mineros.
Extracción de minerales	As, Cd, Cu, Pb, Zn	Presencia en las minas como en los subproductos.
Fundición	As, Cd, Pb, Tl	Procesado del mineral para obtención de metales.
Metalúrgica	Cr, Cu, Mn, Pb, Sb, Zn	Procesado térmico de metales.
Aleaciones y aceros	Pb, Mo, Ni, Cu, Cd, As, Te, U, Zn	Fabricación, eliminación, reciclaje de metales.
Gestión de residuos	Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Co, Zn	Incineración de los residuos o lixiviados.
Corrosión metálica	Fe, Cr, Pb, Ni, Co, Zn	Inestabilidad de los metales al ser expuestos al medio ambiente.
Galvanoplastia	Cr, Ni, Zn, Cu	Efluentes líquidos de procesos de recubrimiento.
Pinturas y pigmentos	Pb, Cr, As, Ti, Ba, Zn	Residuos acuosos procedentes de la fabricación y el deterioro de la pintura vieja.

Industria	Metales	Contaminación provocada
Baterías	Pb, Sb, Zn, Cd, Ni, Hg	Fluido de la pila de residuos, contaminación agua y suelo.
Electrónica	Pb, Cd, Hg, Pt, Au, Cr, As, Ni, Mn	Residuos metálicos acuosos y solidos desde el proceso de fabricación y reciclaje.
Agricultura y ganadería	Cd, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn, As, Mn, Cu	Contaminación de escorrentía, agua superficial y subterránea, bioacumulación.

(Caviedes *et al.*, 2015).

2.1.3 Contaminación por Cr en México

Dentro de los metales pesados, el Cr es de especial interés por varias causas; se puede encontrar en el aire, suelo y agua, cambiando su estado de oxidación, pero su reacción depende de las condiciones del medio donde está presente. Según la Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades, por sus siglas en inglés “ATSDR” (2011), las principales estructuras de los estados de valencia son: Cr⁰, Cr⁺³ y Cr⁺⁶, este último es el considerado más toxico para el ambiente y la salud.

Cuando este metal rebasa el límite máximo permisible que es de un 1 mg L⁻¹ es considerado como contaminante, se emplea en procesos de fabricación en aleaciones metálicas de acero inoxidable, tratamiento de madera y curtidoras (Ortiz, 2014; DOF, 1996). Una vez que el Cr ingresa al agua se adsorbe y es sedimentando, volviéndose inmóvil, un porcentaje relativamente pequeño del Cr se disuelve.

Álvarez *et al.* (2004) mencionan que, dentro del país el mayor índice de contaminación por cromo se localiza entre los municipios de León y San Francisco del Rincón pertenecientes al estado de Guanajuato, que cuenta con alrededor de 650 industrias curtidoras de piel, las cuales requieren de un alto consumo de agua en los procesos, el agua residual no es recuperada y es descarga hacia los ríos.

La empresa Cromatos de México funcionó desde el año de 1958 hasta 1978, establecida en la colonia Lechería perteneciente al municipio de Tultitlán, Estado de México, esta compañía se dedicó a la producción de pigmentos y sustancias para el curtimiento de pieles a partir del mineral cromita, cabe mencionar que contaba con un tratamiento de aguas residuales la cual era operada de manera de inadecuada provocando elevados índices de contaminación por el Cr^{+6} en el agua, lo cual generó muertes en la población y enfermedades en menores de edad. La Secretaría de Recursos Hidráulicos determinó mediante en 1976 una concentración de 5 ppm Cr^{+6} , cinco veces más de lo permitido por la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Téllez *et al.*, 2004; DOF, 2010; Menchaca, 2015).

Otro caso por contaminación de este metal, tuvo suceso en el municipio de San Francisco del Rincón, Guanajuato, donde se ubica la fábrica Química Central S.A. DE C.V. la cual se dedicó por más de 40 años al procesamiento del Cr^{+6} para después ser ofrecido a las empresas zapateras de la zona, las afectaciones por este contaminante en la zona dieron lugar a la contaminación de pozos de los pobladores, enfermedades respiratorias, insuficiencia renal y cáncer, pues las partículas del cromo eran dispersadas por el aire, por tal motivo la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) dio una clausura total temporal y una sanción económica el 26 Abril 2017, pues durante la visita localizó 196,000 toneladas de residuos Cr^{+6} , 11,655 m³ de Alúmina con Cr^6 , 14,091 m³ de lodos de hidróxido de cromo y 3,396 m³ de escombros con cromo por demolición de áreas de procesos de la empresa sin tratamiento y/o confinamiento (Hernández, 2017; PROFEPA, 2018).

2.2 Impacto al Ambiente de Cr

El impacto negativo por un contaminante tóxico en un ecosistema depende de sus características: concentración, movilidad, tiempo de exposición, disponibilidad, persistencia y toxicidad. Los metales pesados son elementos no degradables en el medio ambiente, por lo cual cuando éstos se introducen en entornos bióticos

participan reacciones de óxido-reducción y precipitación por lo que sus características antes mencionadas son modificadas, la solubilidad o insolubilidad de los iones metálicos dependen del pH y componentes inorgánicos e orgánicos que presente el medio. Los organismos vivos son los más expuestos a los efectos tóxicos debido a los procesos de bioacumulación y biomagnificación del contaminante (Vullo, 2003; Villalobos *et al.*, 2014).

Orozco y Toro (2007) señalan en su investigación que la toxicidad de los metales pesados en los ecosistemas acuáticos depende de ciertos factores como son:

- Características del agua (dureza, pH, compuestos orgánicos, acidez, carbonatos).
- Proceso de oxidación del metal (precipitación, interacción iónica, acción bacteriana, unión con compuestos orgánicos).
- Forma del metal (ión o compuesto).
- Concentración.

Las concentraciones elevadas de metales pesados, tal es el caso del Cr, causan envenenamiento en los organismos de flora y fauna expuestos a aguas contaminadas, en los seres vivos puede causar problemas respiratorios, deformaciones e infertilidad y alteran a los procesos bioquímicos y fisiológicos. (ATSDR, 2015; Reyes *et al.*, 2016; Londoño-Franco *et al.*, 2016).

Chávez (2010b) menciona que el Cr⁺⁶ en los ecosistemas acuáticos se encuentra en forma soluble por lo cual puede ser transportado por el agua, pero es reducido a su valencia III por otras especies químicas, en este estado comienza a precipitarse y a acumularse en otras partículas suspendidas o sedimentadas en el fondo, después las especies acuáticas ingieren este metal causando que se acumule en su organismo, la mayoría de esta fauna son peces.

Méndez-García *et al.* (2000) demuestran en su análisis que las concentraciones de metales pesados en el agua empleada para el riego de cultivos están por debajo del límite permisible, pero el pH y la materia orgánica del suelo puede favorecer la acumulación de los contaminantes en los cultivos, con ello aumenta la fitotoxicidad, presentando la inhibición de la fotosíntesis y el crecimiento, disminución de tamaño en las hojas y flores, presencia de clorosis (Reyes y Barreto, 2010).

Los metales pesados en los ecosistemas de las zonas costeras pueden acumularse en los organismos y posteriormente se lleva el incremento del metal a través de la cadena trófica, Sobrino-Figueroa *et al.* (2007) en su estudio realizado acerca de la evaluación del riesgo de ingerir moluscos contaminados por metales pesados, indica que en los tejidos de la vieira tienden a llevarse la acumulación de cadmio (Cd), Cr y Pb en niveles superiores en comparación con otros moluscos. Para algunas especies la acumulación depende de la especie, tamaño del individuo, sexo, etapa de vida y su alimentación, también de la temporada del año debido a los factores de aumento de temperatura, pH, nutrientes, dureza del agua, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos, intensidad de luz y movimiento del agua (Cantillanez, 2005; Orozco y Toro, 2007).

La acumulación del Cr en las plantas depende del estado de valencia, el Cr⁺³ se absorbe pasivamente, por el contrario el Cr⁺⁶ es activo debido a los sulfatos lo cuales son los transportadores, los efectos negativos en las plantas es la inhibición de crecimiento, clorosis, hojas pequeñas, disminución del crecimiento radicular, inhibición de la fotosíntesis, mientras que en algunas algas el cromo al interactuar con el ADN, proteínas y grupos SH tiene efecto en el metabolismo celular en donde se disminuye el ATP, las células comienzan a sufrir deformaciones (Barceló *et al.*, 1987; Giardina *et al.*, 2012).

2.3 Toxicología Ambiental del Cr

Peña *et al.* (2001) define a la toxicología ambiental como el estudio y evaluación de los daños causados en la salud de la población expuesta ante los tóxicos presentes en el medio, también estudia el efecto en especies de flora y fauna. El Organismo Internacional de Energía Atómica por sus siglas en inglés "IAEA" en el boletín de protección de nuestro medio marino, menciona que los organismos consumen las sustancias tóxicas presentes en el medio, cuando éstas no son asimiladas por el metabolismo de la especie comienzan a acumularse, llamando a este proceso bioacumulación. El termino biomagnificación es referido al proceso de biacumulación a nivel de la cadena trófica en concentraciones mayores (IAEA, 2013).

La ATSDR (2016) indica que el Cr^{+6} entra al cuerpo y es transformado a Cr^{+3} , este es expulsado aproximadamente en una semana por medio de la orina pero también puede permanecer durante años en las células. Las vías de exposiciones al cromo son por el consumo de agua contaminada, alimentos bioacumuladores, inhalación de partículas del contaminante o contacto cutáneo con este. Clínicamente es determinada la presencia del metal en el cuerpo humano a través de la orina, sangre o cabello, estas pruebas sólo indican la presencia del contaminante pero no pueden predecir exactamente el efecto a la salud, pues éste depende de la concentración con la que se tuvo contacto (Chávez, 2010a; ATSDR, 2011).

Un aspecto importante a tener en cuenta sobre la toxicología del Cr son las especies químicas que presenta y la relación que ejerce sobre la salud del individuo. El Cr^{+3} es considerado un esencial nutriente para los procesos bioquímicos y fisiológicos en el ser humano, contribuye en el metabolismo de la glucosa, colesterol y ácidos grasos y en las reacciones enzimáticas (Téllez, 2014). Así mismo, Rodríguez (2017) hace mención que a falta de este nutriente el órgano afectado es el corazón teniendo como consecuencias los trastornos metabólicos y diabetes, sin embargo, el exceso del Cr^{+3} ocasiona erupciones cutáneas.

Dentro del cuerpo humano, el Cr se encuentra en el plasma, una parte se encuentra fijada a la proteína encargada de transportar el hierro en el plasma de los seres humanos y otra parte está en el factor de tolerancia a la glucosa, la cual se sintetiza a partir de este compuesto absorbido que tiene la función de ayudar a la insulina a regular los niveles de azúcar en la sangre. En el cerebro, glándulas suprarrenales, músculo, piel, testículos, riñones y tejido adiposo es donde se localiza en mayor concentración, para los órganos como el corazón y pulmones se tienen concentraciones menores, el cuerpo lo expulsa mediante la orina. Algunas de las principales funciones del Cr⁺³ son las siguientes (Recasens, 2006):

- Medir las concentraciones de los distintos lípidos de grasas en la sangre
- Disminución de colesterol VLDL
- Disminución de triglicéridos
- Aumento del HDL colesterol
- Disminución de somnolencia

Los niveles del cromo en el organismo se reducen a casos de dietas altas en azúcar, exceso de ejercicio, embarazo, lactancia, infecciones, traumas físicos.

Por otra parte, como ya se ha mencionado en los capítulos anteriores el Cr⁺⁶ se considera un peligro para la salud. El Cr⁺⁶ ingresa al organismo disolviéndose lentamente lo cual genera una exposición a las células pulmonares, pues este se concentra en la célula y se reduce a sus valencias Cr⁺⁵, Cr⁺⁴ y Cr⁺³, cuando el organismo no logra reducir el Cr⁺⁶ este se acumula y causa un aumento de citotoxicidad y destrucción o muerte celular, neoplásica y cáncer. Algunos de los efectos ocasionados son: debilitamiento del sistema inmune, alteración en el sistema nervioso, reacciones alérgicas, erupciones cutáneas, daño en riñones e hígado, irritación y sangrado en la nariz, conjuntivitis crónica, problemas respiratorios, úlceras estomacales, alteración genética y hasta la muerte (Méndez-García *et al.*, 2000; Beltrán y Gómez, 2015; Rodríguez, 2017).

En su mayoría los compuestos de Cr^{+6} demuestran ser los inductores mutagénicos en células eucariotas y procariotas, cuando la elevada concentración de este metal sobrepasa la capacidad de reducción del citoplasma, este migra al núcleo donde es reducido y se producen radicales de oxígeno y sulfuro cercanos al ADN, pueden disminuir la replicación y fidelidad de la enzima ADN polimerasa, dando lugar alteraciones en la síntesis del ADN. Así mismo pueden inhibir la síntesis de ARN polimerasa, destrucción del proceso mitótico y rupturas en los cromosomas, afectación en la síntesis de la hemoglobina (Ávila-Perez y Zarazúa-Ortega, 1993).

Los gobiernos federales toman medidas de control para evitar la contaminación y asegurar la salud a través de reglamentos y recomendaciones que diversas agencias desarrollan. Un ejemplo son las agencias de EUA; EPA, OSHA, FDA, las cuales establecen límites permisibles de las sustancias tóxicas, por otra parte, NIOSH y ATSDR son agencias que las que desarrollan algunas recomendaciones, cada una actualiza los reglamentos y recomendaciones cuando se tiene nueva información (Cuberos *et al.*, 2009; ATSDR, 2016). En México se cuenta con la Secretaría de Medio Ambiente “SEMARNAT”, la cual a su vez presenta regulaciones en cuestiones ambientales

El límite permisible es una concentración o contenido máximo o intervalo de valores de un componente, el cual no debe ser excedido. Se observan los límites permisibles recomendados por cada una de las agencias antes mencionadas para el Cr (Cuadro 2).

Cuadro 2: Límites permisibles para el cromo

Agencia	Límite permisible
EPA niveles en agua potable	0.1 mg/L
FDA niveles en agua en botella	0.1 mg/L
OSHA limites en el aire de trabajo	Promedio para jornadas diarias de 8 hr: 0.005 mg/m ³ para Cr ⁺⁶ 0.5 mg/m ³ para Cr ⁺³ 1.0 mg/m ³ para Cr
NIOSH niveles en el aire del trabajo recomendados	Promedio para jornadas diaria de 8 hr: 0.5 mg/m ³ para cromo metálico, Cr ⁺² , Cr ⁺³ Promedio para jornadas diaria de 10 hrs: 0.001 mg/M ³ para el Cr ⁺⁶ ,.
NOM-001-SEMARNAT-1996	En agua de ríos para uso de riego agrícola: 1 mg/L En agua de ríos para uso público urbano y protección de vida acuática: 0.5 mg/L

(DOF, 1996; ATSDR, 2016)

2.4 Remoción de Metales Pesados

Los sitios contaminados pierden su capacidad de degradación, por esta razón se considera difícil la remoción natural en los sitios alterados, para resolver esta problemática se ha implementado diversas tecnologías (Abha y Swaranjit, 2012).

Se clasifica a los métodos para la remoción en convencionales (floculación, precipitación, oxidación, reducción, intercambio iónico, filtración, tratamiento electroquímico, tecnologías de membrana, adsorción química, adsorción con carbones activados y recuperación por evaporación) y no convencionales

(Bioadsorción, precipitación extracelular, bioadsorción) siendo estos últimos los actualmente la tecnología económica y amigable con el ambiente (Cañizares-Villanueva, 2000; Quiñonez *et al.*, 2014).

2.4.1 Filtración por membrana

Este método es aplicado para el tratamiento y recuperación de sales metálicas presentes en el agua contaminada por actividades industriales, presentando la ventaja requerir poco espacio para su instalación, su alta eficiencia de remoción por arriba del 97%, fácil operación, pero la desventaja que presenta es la generación de lodos con metales, ineficiencia en bajas concentraciones del contaminante, altos costos de inversión y operación.

Se clasifican por las características de diseño; material de la membrana, permeabilidad, solubilidad del soluto y solvente en la película (Cañizares-Villanueva, 2000; Bermejo, 2016). Su proceso se basa en pasar un efluente contaminado a través de una membrana semipermeable por medio de presión donde los contaminantes son retenidos mediante membranas; las cuales se clasifican en ósmosis inversa, ultrafiltración y nanofiltración, diferenciadas por el tamaño de los poros de la membrana, este proceso es automatizado. (Ávila *et al.*, 2000; Dimas, 2011; Quiñones *et al.*, 2014; Caviedes *et al.*, 2015).

2.4.2 Intercambio iónico

Esta tecnología es empleada en purificación y tratamientos de agua, los intercambiadores iónicos empleados comúnmente son zeolitas, humus, arcillas, resinas orgánicas y sintéticas (Zerquera *et al.*, 2000).

Izquierdo (2010) menciona que es el proceso en el cual los iones no deseados de un efluente se pasan a una columna empaquetada donde ocurre una reacción química en la que los iones libres móviles de un sólido (resinas de intercambio

iónico) se cambian por los iones del elemento que se desea eliminar, la desventaja de este método es el costo elevado de la columna, como ventaja presenta una remoción de metales a bajas concentraciones. Algunos factores a considerar para emplear esta técnica son: pH, temperatura, naturaleza, estructura y número de grupos ionizables en su estructura en el agente empleado como intercambiador (Leyva *et al.*, 2005; Pérez-Moreno *et al.*, 2006).

La investigación de Chávez (2010) describe que las resinas de intercambio iónico empleadas para la remoción de sustancias no deseadas son consideradas como contaminantes, ya que pueden contener impurezas que generen un producto tóxico. Las resinas son clasificadas dependiendo del uso de aplicación en catiónicas y aniónicas (Cjuno y Zegarra, 2012).

2.4.3 Coagulación-Floculación

La coagulación en el tratamiento de aguas residuales consiste en la desestabilización de partículas coloidales mediante la neutralización de su carga negativa, por medio de un coagulante (sulfato de aluminio o hierro, polímeros o polielectrolitos) para esto se emplea un medio de agitación rápido lo cual genera la formación de un flóculo.

Por otra parte, la floculación consiste en la unión entre los flóculos formados en un medio de agitación lenta, los cuales tienen peso mayor a los del agua lo cual es favorable para que se puedan sedimentar. Las variables que influyen en estos dos procesos son el pH, temperatura, velocidad de agitación, tiempo de agitación, tipo y cantidad de coagulante, estado de oxidación, tamaño de partículas, valencia y concentración del contaminante y solutos inorgánicos presentes (Méndez *et al.*, 2008; Restrepo, 2009; Francisca y Carro, 2014).

Para la operación de coagulación-floculación, Pavlovska *et al.* (2003) indican que el pH debe ser correctamente seleccionado para asegurar la eficiencia de remoción.

Primero se añade al efluente un coagulante el cual reacciona con el agua creando hidróxidos de aluminio y de hierro con cargas positivas, el contaminante posee carga negativa lo cual permite que sea adsorbido por el coagulante de esta manera se obtienen los flóculos, posteriormente se adiciona el floculante para generar aglomeración de flóculos y por último se precipitan y/o filtran, este método produce como desecho lodos los cuales deben ser analizados para determinar la eficiencia de remoción del contaminante y el grado de toxicidad de estos (Soto, 2004; Méndez *et al.*, 2009; Bravo, 2017).

2.4.4 Electrocoagulación

Tecnología empleada para remoción de metales, sólidos, contaminantes y partículas coloidales inorgánicas solubles en medios acuosos, donde se introducen especies de hidroxilos de metal altamente cargados logrando una neutralización en las cargas electrostáticas facilitando la coagulación-floculación y por último separar el contaminante mediante precipitación y/o flotación. Los parámetros de pH, conductividad y potencial óxido-reducción se deben variar dependiendo al tipo de contaminante que se desee remover. La hidrólisis, electrólisis o formación de radicales de las otras sustancias presentes en el agua participan en la destrucción o insolubilidad de los contaminantes (Guohua *et al.*, 2000; Mollah *et al.*, 2001; Guohua, 2004; Arango, 2005).

Este método consiste en la implementación de placas paralelas o tubulares para ocasionar una desestabilidad en los coloides (suspendidos, disueltos o emulsificados) a través de una corriente eléctrica, donde los cationes en el ánodo entran a la solución reaccionando con las especies presentes formando óxidos metálicos y precipitando a los hidróxidos. Piña-Soberanis *et al* (2011) hacen mención que los iones liberados durante este proceso crean cadenas de polihidroxidos largas las cuales causan que se presenten estructuras con una hidratación menos a los de la coagulación, este beneficio facilita la compactación de los flóculos y la desecación de los lodos. Presenta las ventajas de requerir equipo

simple y de fácil operación, efluentes con menores sólidos disueltos, eliminación de partículas coloidales finas, pero como desventajas los electrodos deben ser reemplazados regularmente ya que éstos se disuelven, formando película de óxido en el cátodo afectado la eficiencia (Mollah *et al.*, 2001; Bravo, 2017).

2.4.5 Adsorción

La adsorción es el proceso selectivo por el cual los elementos (adsorbato) de un efluente son adsorbidos generalmente en monocapas sobre la superficie de los poros de un material sólido (adsorbente). Teniendo como principio a tres mecanismos de separación, uno de ellos es el estérico; en el cual solo ingresan a los poros del adsorbente las moléculas pequeñas, otro es el de equilibrio en el cual la especie que mayormente se retiene es la eliminada y el cinético donde la que más se dispersa por velocidad es la separada (Caviedes *et al.*, 2015; Tejeda *et al.*, 2016).

Existen dos tipos de adsorción siendo una de ellas la física en donde la adherencia se dan en las superficies de adsorbente y adsorbato a través de las fuerzas de Van de Waals, por lo cual se consideran adsorciones débiles y reversibles, por otra parte la adsorción química la interacción se da mediante enlaces químicos donde se transfieren electrones para reducir al contaminante en especies no tóxicas, por lo que las fuerzas de este tipo son fuertes e irreversibles (Somasundaran y Krishnakumar, 1997; Mestanza, 2012).

La eficiencia de la adsorción, depende de la correcta selección del material adsorbente; es importante determinar las características físicas del material: área superficial, volumen del poro y capacidad de adsorción. Algunos adsorbentes utilizados en este proceso son en su mayoría químicos inorgánicos, lo cual puede llegar a generar un producto de desecho tóxico (Correa *et al.*, 2010; Vilarrasa, 2014).

Este proceso puede llevarse en diferentes tipos de sistemas: líquido-líquido, gas-sólido o líquido sólido, la separación se da cuando las moléculas del contaminante (colorantes iónicos, metales pesados, material radioactivo, contaminantes orgánicos e inorgánicos), se adhieren en los sitios activos de la superficie del material adsorbente. La adsorción depende del tipo, cantidad y capacidad de adsorción del material adsorbente y del contaminante, pH, temperatura y tiempo de contacto, la determinación de las concentraciones antes y después del método se pueden evaluar mediante titulación y espectrofotometría, siendo estas las más utilizadas (Maron y Prutton, 2002; Tan y Xiao, 2008; Pinzón-Bedoya y Vera 2009; Cardona *et al.*, 2013).

Como se mencionó en el párrafo anterior, el pH juega un papel importante en la adsorción, Eggs *et al.* (2012), citan que a pH ácidos el cromo es adsorbido en su especie química aniónica HCrO_4^- favorecido por que la superficie de adsorbente se encuentra protonada y al incrementar el valor del pH esta propiedad se ve perjudicada afectando el porcentaje de remoción, en diversos estudios se ha demostrado que el rango de pH óptimo es de 1-4 para la remoción de Cr^{+6} (Cobos *et al.*, 2005; Navarro *et al.*, 2006; Cobos *et al.*, 2009; Duarte *et al.*, 2009).

La adsorción de iones metálicos da lugar a reacciones exotérmicas, por lo cual temperaturas altas causan alteraciones en el material adsorbente provocando una deficiencia de remoción; Caviedes *et al.* (2015) en su estudio demuestran que la temperatura a medio ambiente es la ideal para llevar a cabo el proceso de adsorción de Cr^{+6} , el tiempo de contacto es necesario para poder valorar la capacidad de adsorción, la característica físicas y químicas, pretratamiento del adsorbente, el rango ideal de esta variable depende del material adsorbente empleado en cada análisis (Sposito, 2008; Carro, 2012; Tejeda-Tovar *et al.*, 2015).

Las características texturales (área superficial, volumen de poros y tamaño de partícula) de los adsorbentes es otro parámetro importante en el proceso de adsorción, cuando se tienen adsorbentes que presentan una mayor área superficial

los porcentajes de remoción son favorables, los sólidos porosos presentan una superficie mayor a los demás por lo cual se vuelven los materiales ideales para emplearse en dicho método (García, 2014; Patiño *et al.*, 2014).

La cinética de adsorción determina los parámetros óptimos de velocidad de agitación y el tiempo de contacto para que el proceso alcance el equilibrio, el cual indicara la capacidad de remoción del material, cuando ésta comienza la velocidad en la que se adhieren los iones contaminantes es alta debido a que se tiene un alto número de sitios activos, después de haber transcurrido el tiempo de contacto la capacidad de adherencia disminuye debido a que los sitios activos se redujeron y la adsorción consigue el equilibrio (Tejada *et al.*, 2015; Vega 2018).

2.4.6 Adsorción de Cr⁺⁶ por materia orgánica

En la adsorción con materia orgánica, también conocida como bioadsorción, implica dos fases: sólida (biomasa) y una líquida (agua con el adsorbato), se puede utilizar biomasa viva o muerta como adsorbente, es una tecnología innovadora que ha demostrado eficiencias de remoción similares a los métodos convencionales, presenta bajos costos de inversión y operación (Tejada-Tovar *et al.*, 2014; Sánchez y Cameselle, 2016).

La mayoría de bioadsorbentes empleados provienen de desechos industriales o agrícolas; estas biomasas se caracterizan por tener en su estructura moléculas proteicas, polisacáridos, nucleótidos con grupos no polares (carboxílicos, aminos, fosfatos, tioles e hidróxidos), los cuales sirven como sitios activos y son capaces de atraer a los contaminantes con cargas opuestas. A algunos bioadsorbentes se les realiza una modificación química o física con el fin de obtener una mayor superficie de contacto (Cañizares-Villanueva, 2000; Eggs *et al.*, 2012; Acosta *et al.*, 2012b). Actualmente, se tienen estudios donde se investiga la remoción de Cr⁺⁶ empleando materia orgánica considerada como un residuo, el principal objetivo es disminuir el impacto en el ambiente causado por el Cr⁺⁶, de acuerdo a la revisión de la literatura

se encuentran el uso de la corteza de árboles con remoción del 95.6% (Netzahuatl-Muñoz *et al.*, 2010a), una remoción del 99.8% con la cáscara de aguacate (Netzahuatl-Muñoz *et al.*, 2010b), para la cáscara de tamarindo se tiene 100% de remoción (Acosta *et al.*, 2010), el compostaje alcanza una remoción del 100% (Vargas-Nieto *et al.*, 2011), una remoción del 72.8% con cascarilla de arroz (Rodríguez *et al.*, 2012), cáscara de mamey logra una remoción del 100% (Acosta *et al.*, 2012b), la yuca demostró una remoción del 70% (Albis *et al.*, 2015), cáscara de plátano consigue una remoción del 80% (Ali *et al.*, 2016) y con residuos de cacao se alcanza una remoción un 80% (Tejeda *et al.*, 2017), aclarando que cada una de las de las aplicaciones anteriores, los investigadores modificaron las variables que influyen dentro del proceso de adsorción.

Dentro del territorio mexicano, Acosta *et al* (2008) y Cárdenas-González y Acosta-Rodríguez (2011) obtienen una remoción del 100% teniendo como biomasa hongo (*Paecilomyces sp.*), en el estado de México Villanueva (2017) consiguió una remoción del 92 % empleando cáscara de *Musa paradisiaca* (Nombre común plátano), por otra parte Campos (2008) logro un 52% de remoción aplicando como biomasa la cáscara de nopal (*Ectodermis de Opuntia*), Vega (2018) obtuvo una remoción de 94.6% utilizando vainas de vainilla (*Vanilla plannifolia, ex Andrews*).

Para el caso de la materia orgánica proveniente de plantas, éstas contienen un polímero llamado la lignina, el cual se encarga de dar dureza y resistencia a las paredes celulares de las células vegetales, su naturaleza es de fenoles. Teniendo como función unir las paredes celulares por lo cual se considera un pegamento natural de las fibras celulósicas. La remoción de metales pesados empleando biomasa orgánica vegetal se debe a los fenoles y otros grupos funcionales que se encuentran en la superficie los cuales permiten la afinidad a los iones metálicos, la eficiencia del proceso de bioadsorción depende de estos. A algunas biomásas se les realiza un tratamiento de modificación química (hidrólisis ácida, básica, para mejorar su capacidad de adsorción ante el metal a remover (Gomez *et al.*, 2013; Tejeda-Tovar *et al.*, 2015).

Es de relevancia destacar que, dentro de la gran gama de estudios de adsorción por materia orgánica, los estudios de adsorción por hoja de bambú son escasos o nulos, abriendo un área de oportunidad de investigación.

2.4.7 Bambú

Dentro de la familia *Poaceae* o Gramíneas se encuentra la subfamilia *Bambusoideae* que tiene por nombres comunes Bambú o caña, esta subfamilia tiene 90 géneros y alrededor de 1300 especies, estando divididos en tres tribus siendo una la *Bambuseae* (Bambús leñosos en clima tropical), otra es la *Olyreae* (Bambús herbáceos) y *Arundinarieae* (Bambús leñosos en clima templado) (Mercedes, 2006; Visarrea, 2018).

La distribución se tiene dentro de los continentes de África, América, Asia y Oceanía (Fig. 1), crecen en zonas tropicales y subtropicales, además se encuentran en altitudes desde 0 a 4300 metros sobre el nivel del mar

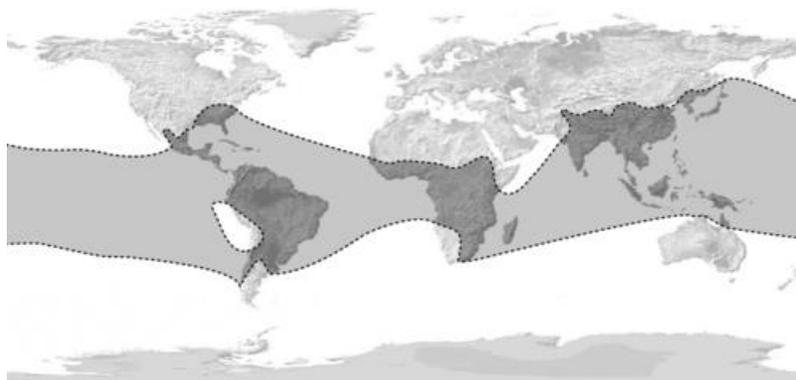


Fig.1. Distribución del bambú en el mundo (Martínez, 2015)

Pueden llegar a medir hasta 30 m de altura y tener diámetros de 10 a 20 cm, la forma y el tamaño de las hojas del bambú varían de acuerdo a la especie, las cañas son huecas pero resistentes, en diversos países se emplean en construcciones, fabricación de muebles, papel, instrumentos musicales, y últimamente utilizada como biomasa (Pérez-García *et al.*, 2009; Pochettino *et al.*, 2009; Calva, 2015).

En el territorio nacional de México se tienen 11 géneros y 39 especies, los estados que cuentan con más especies nativas de Bambú son Chiapas, Oaxaca y Veracruz (Fig. 2). En el país es utilizado para la construcción de viviendas y/o muebles, actualmente existen estudios donde son empleados para la creación de carbón activado y como bioextractores en humedales (Cedaño y Irigoyen., 2011; Martínez., 2015; Salas, 2016).

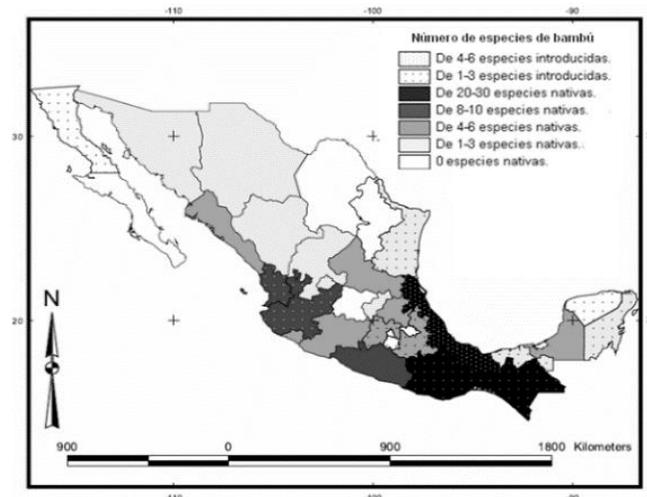


Fig. 2: Distribución del Bambú en México

En Veracruz se tienen ocho géneros nativos de Bambú de los cuales se tienen las siguientes especies: *Chusquea muelleri*, *Phyllostachys bambusoides*, *Guadua aculeata*, *Guadua amplexifolia*, *Guadua longifolia*, *Guadua velutina*, *Guadua paniculata*, *Aulonemia fulgor*, *Aulonemia laxa*, *Olmecca recta*, *Olmecca reflexa*, *Rhipidocladum bartlettii*, *Rhipidocladum martinezii*, *Rhipidocladum pittieri*, *Rhipidocladum racemiflorum* (Cortés, 2000).

Carmioli (2009) menciona que los beneficios ambientales del bambú son diversos: evita la erosión del suelo, muros de contención a orillas de un cuerpo de agua, recuperación de suelos salinizados, captación de dióxido de carbono, almacena grandes volúmenes de agua, regulación de caudales, por su abundante cantidad de residuos de hojas enriquecen al suelo.

2.5 Determinación de Cr⁶

Para la determinación de la remoción y evaluación de Cr⁶ en aguas de interés humano, son empleadas diversas técnicas instrumentales; absorción atómica, espectrofotometría de masa con plasma acoplado (ICP-MS), espectrofotometría de emisión atómica de plasma acoplado (ICP-AES), espectrofotometría por rayos X, cromatografía iónica, cromatografía de gases, cromatografía de gas asociada a un espectrofotómetro de masa (CG-MS), electroforesis capilar (EC) (Urrutia *et al.*, 2002; Coedo y Dorado, 2010).

La espectrofotometría es el método más empleado en el análisis de la concentración de metales pesados presentes en aguas contaminadas, en estos equipos el haz de luz atraviesa las partículas de la muestra después pasa a un fotómetro donde se mide la longitud de onda y es transmitida la absorbancia obteniendo el resultado en unidades de nanómetros. (Henríquez, 2013; Doria *et al.*, 2013).

La cromatografía se clasifica de manera general en líquida y de gases, siendo una técnica de identificación y determinación de una concentración de algún elemento presente en una muestra obteniéndolos mediante la separación del compuesto a determinar, el efluente es llevada por una fase móvil (gas o líquido) a la fase estacionaria (sólido) en una columna donde se va realizando la separación de los componentes de la mezcla (Rosero, 2017).

2.5.1 Espectrofotometría de masa con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)

Para la determinación de metales pesados se emplea la espectrofotometría de masa con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), esta técnica es una de la más empleada en el análisis de aguas contaminadas (Taseidifar *et al.*, 2017). Es la medición del espectro generado por los átomos libres en la fuente de calor, teniendo como detector el acoplamiento del plasma (Lorenzo *et al.*, 2010; CENAM, 2012).

La espectrofotometría de masa obtiene los iones separándolos de acuerdo a su masa y carga para ser detectados por el dispositivo de lectura, al acoplarse el plasma, esta técnica permite tener un rango de determinación amplio. En la técnica son excitados los electrones de la muestra a analizar por medio de un ion plasma con temperatura elevada y presión atmosférica con un espectrómetro de masa bajo vacío, en el cual se comienzan a generar espectros lo cuales son determinados y analizados de acuerdo a su masa (Kastenmayer, 1997).

2.5.2 Espectrofotometría de absorción atómica (AA)

CENAM (2012) cita que este tipo de espectrofotometría tiene como fundamento la medición de la concentración del elemento en análisis, en donde se hace pasar una radiación de una fuente de luz monocromática y la concentración es determinada por la diferencia entre la radiación incidente y transmitida, puede determinar concentraciones pequeñas que van desde μgL^{-1} a mgL^{-1} (Molina, 2013)

Este método genera átomos en estado de reposo a temperaturas elevadas, midiendo la energía absorbida que proporciona la concentración del metal pesado, se realiza los modelos de regresión con las características fisicoquímicas del agua, la muestra ingresada en esta técnica deberá pasar un proceso de digestión, para este método se emplean distintas atomizaciones de la muestra por flama, generación de hidruros, horno de grafito y vapor frío que se generan dentro del equipo de espectrofotometría de absorción atómica (Gómez-Álvarez *et al.*, 2004; Mancilla-Villa, 2012; Moreno-Bonett *et al.*, 2012; DOF, 2016).

2.5.3 Espectrofotometría de fluorescencia de rayos X (FRX)

Esta técnica se basa en la excitación y reordenamiento de los electrones en los átomos del elemento a analizar por medio de una radiación electromagnética (Rayos-X), la radiación fluorescente emitida es provocada por la transición de orbitales que da los electrones de cada elemento generando energía que se emite

en forma de fotones fluorescente, los cuales pasan a un detector para obtener los datos de los elementos presentes (Ávila-Pérez y Zarazúa-Ortega, 1993; Valentinuzzi, 2008). Salazar *et al.* (2004) menciona que es una tecnología que determina simultáneamente a varios metales presentes en una muestra, esto se debe a que cada elemento produce un diagrama de difracción diferente, los elementos pueden ser determinados en estado puros o en mezcla (Quijano *et al.*, 2010; Souza, 2013).

2.5.4 Cromatografía iónica

En la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada por sus siglas en inglés "UIPAC" (IUPAC,1995) define a la cromatografía como un método físico de separación de los componentes de una muestra, distribuyéndolos en dos fases, la estacionaria y la móvil moviéndose en una dirección determinada, en la determinación de metales pesados se emplea la cromatografía iónica. (Adarve y Rebollo, 1993; Armijo *et al.*, 2008; Srinivasan, 2017).

Como ya se mencionó anteriormente se tiene una dispersión de solutos entre la fase móvil y estacionaria, utilizando en esta última una columna de resina de intercambio iónico a la que se adhieren los iones y moléculas polares de la muestra a esta superficie, es empleada en los análisis de metales a bajas concentraciones, la determinación del material se lleva de acuerdo al pictograma obtenido (Trujillo *et al.*, 2009; Sánchez *et al.*, 2009; Pohl, 2017; Srinivasan, 2017).

2.5.5 Cromatografía de gases (GC)

Aplicada en la determinación de contaminantes orgánicos en muestras acuosas y no acuosas, para la implementación de este método es necesario analizar las propiedades físicas y químicas de la muestra, se debe implementar una columna y detector para la evaluación de concentraciones, la eficiencia se determina por la

técnica de inyección, velocidad del gas portador, eficiencia de la columna y el detector empleado (Patnaik, 2010).

La muestra es inyectada dentro del equipo en donde se volatiliza y se mezcla con el gas portador (fase móvil), posteriormente es llevada hacia la columna de compuesto sólido (fase estacionaria) donde son separadas las sustancias de la muestra, comúnmente esta columna se encuentra en forma de espiral dentro de un horno, la separación se lleva por lo diferentes componentes de gases que interactúan con la fase estacionaria, por último en la salida se tiene un detectores donde son identificados los componentes de la muestra por la evaluación de los picos cromatográficos (Moreno y Guerrero, 2002).

2.5.6 Cromatografía de gas asociada a un espectrofotómetro de masa (CG-MS)

Este método se fundamenta en dos técnicas de determinación, siendo una la cromatografía de gas en donde se lleva a cabo la separación de los elementos de una mezcla compleja mediante la implementación de una columna de cromatografía de gas, la desventaja que presenta es que los picos cromatográficos obtenidos suelen ser no confiables cuando existe un alto número de compuestos en la muestra, dado que se evalúa el tiempo de retención de los compuestos, la otra técnica es la espectrofotometría de masas pero ésta no es capaz de identificar los elementos sin que estos se encuentren separados (Gutiérrez y Drogue, 2002)

Dada la necesidad de determinar mezclas complejas analizando cada uno de los elementos en ellas se realiza la combinación de estas dos técnicas, en donde el procedimiento es primero pasar la muestra por la cromatografía de gases en donde se logran separar cada uno de los compuestos, para lo cual de la espectrofotometría de masas sólo se utiliza el detector de masas, el cual es acoplado a la técnica anterior permitiendo así la determinación de los iones de acuerdo a sus masas (Peña *et al.*, 2003;. Stashenko y Martínez, 2010).

2.5.7 Espectrofotometría ultravioleta-visible (UV-VIS)

La espectrofotometría UV-VIS es una técnica que, con equipo sencillo, de fácil operación y a bajo costo, determina eficientemente la presencia de metales pesados en bajas concentraciones. Este método se basa en la medición de la radiación monocromática absorbida por las moléculas, provocada por los cambios que hacen los electrones en los orbitales por la excitación de un haz de luz (Villatoro, 2006; Piña *et al*, 2012; Ramírez-Gonzalez *et al.*, 2017).

La NMX-AA-044-SCFI-2001 (DOF, 2014) indica que para la determinación de Cr^{+6} se debe emplear el reactivo 1,5-difenilcarbazida en medio ácido generando una reacción de óxido-reducción para obtener el Cr^{+3} , el cual puede ser medido en una longitud de onda de 540 nm en el espectrofotómetro de UV-VIS y la absorbancia es correspondiente a la concentración de cromo en el agua, para este método se debe realizar una curva de calibración previa a la medición de la muestra con las concentraciones a evaluar (Severiche y González, 2013).

Capítulo III. Materiales y Métodos

3.1 Recolección de la Materia Orgánica

Las hojas de la especie utilizada para esta investigación fue *Guadua aculeata* (Fig. 3) nativa de la ciudad de Misantla, Ver. (Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos, 2014), éstas fueron recolectadas en el mes de Octubre dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Misantla (ITSM), siendo las seleccionadas la que se encontraban secas, obteniendo un peso aproximado a 0.500 gr.



Fig. 3: *Guadua aculeata* en el ITSM

3.2 Pretratamiento de la Materia Orgánica

Después de haber conseguido la materia orgánica, se realizó un primer lavado durante 10 min con agua destilada dentro de una cubeta con capacidad de 4 L, a temperatura ambiente. Se desarrolló un segundo lavado, donde se empleó alcohol etílico al 70%, dejando reposar la materia proveniente de bambú durante 3 h en el recipiente antes mencionado, lo anterior con la finalidad de eliminar impurezas presentes en las hojas.

Posterior al lavado, las hojas se colocaron en un secador solar, alcanzando una temperatura de 150°C, el tiempo de exposición se basó hasta que las hojas presentaran un peso constante, el cual se obtuvo en 3 semanas, con la finalidad de eliminar el porcentaje de la humedad presente.

3.3 Obtención de las Partículas

Una vez alcanzado el peso constante, se procedió a la realización de una pulverización de las hojas, empleando un molino manual para la obtención de las partículas, posteriormente para desarrollar una separación del producto se utilizaron tamices de mallas de #30 y #50, obteniendo tamaños de partículas de 0.297 y 0.595 mm (Fig.4).



Fig. 4: Obtención de partículas de la hoja de bambú

3.4 Diseño del Experimento

Los experimentos de remoción se realizaron en dos tratamientos; sin hidrólisis y el otro por hidrólisis básica, en cada una de estas se utilizaron tamaños de partículas de 0.297 y 0.595 mm, se colocaron 25 y 50 mg de masa de las partículas del bioadsorbente en tubos de ensaye de 10 mL, añadiendo a cada uno de estos 5 mL

del agua contaminada con concentraciones de 10 y 25 ppm (Fig.5). Se mantuvieron en agitación por tiempos de 1, 15, 30, 45 y 60 min. Se mantuvo un pH menor a 3, para ello se añadió 1 gota de ácido sulfúrico (H_2SO_4) con una concentración 1:1. Se desarrollaron 3 repeticiones para cada uno de los 4 ensayos de cada concentración; haciendo un total de 240 repeticiones. Cada uno de estos tubos fue leído en el espectrofotómetro Uv-Vis Genesys™ 10, siguiendo el proceso que se le aplicó a la curva de calibración (Fig.6).



Fig. 5: Realización de ensayos



Fig.6: Lectura de las repeticiones en el espectrofotómetro

3.5 Hidrólisis Básica

Para obtener partículas con una modificación química se desarrolló un proceso de hidrólisis básica. La biomasa estuvo en contacto con Hidróxido de Sodio ($NaOH$) al 10%, mediante el método Soxhlet, a temperatura de $105^{\circ}C$ por 3 hr (Fig.7), lo anterior con el objetivo de activar los grupos funcionales que pueden aumentar la capacidad de adsorción. Después del reflujo, se lavó con agua destilada las hojas para minimizar las impurezas que aun puedan existir, por último se hizo un secado a una temperatura de $100^{\circ}C$ por 3 hr. Cabe mencionar que sólo a la mitad de los experimentos se les realizó esta modificación química.



Fig.7: Modificación química del bambú

3.6 Preparación de Soluciones y Determinaciones de Cr⁺⁶

Para la producción de la solución madre del agua sintética contaminada por Cr⁺⁶, fue utilizado Dicromato de Potasio (K₂Cr₂O₇) marca Química Meter, tomando 1 g y aforando a 100 mL con agua destilada, consiguiendo una concentración de 500 ppm, posteriormente se elaboraron diluciones de trabajo (5, 10 y 25 ppm). Para evaluar la linealidad de las soluciones y un posible error se realizó una curva de calibración empleando el espectrofotómetro de Uv-Vis Genesys 10, utilizando como indicador de concentración de Cr⁺⁶ la 1, 5-difenilcarbazida, analizando a una longitud de onda de 542 nm.

La Fig. 8 muestra la curva de calibrado obtenida, en donde se tiene una linealidad cercana a 1, lo cual indica que las concentraciones de trabajo presentadas son idóneas para observar el proceso de remoción del Cr⁺⁶ en el adsorbente.

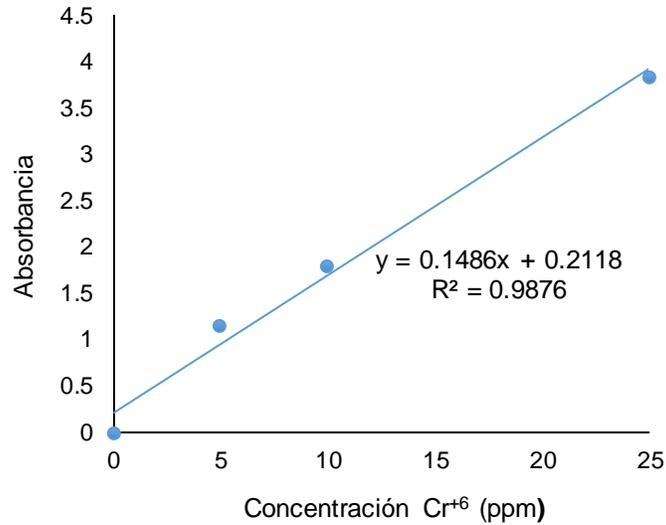


Fig. 8. Curva de calibrado a partir de concentraciones conocidas

3.7 Evaluación de la Capacidad Adsorbente

El porcentaje de remoción de metal pesado se obtuvo usando la siguiente ecuación:

$$\text{Adsorción (\%)} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \dots (\text{Ecn.1})$$

Donde

C_0 = concentración inicial de iones de Cr^{+6}

C_e = concentración en equilibrio de iones de Cr^{+6}

Para evaluar la cantidad de iones adsorbidos por cantidad de masa del bioadsorbente, se utilizó la ecuación 2:

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{W} \dots (\text{Ecn.2})$$

Donde:

q_e : es la cantidad de iones metálicos adsorbidos (mg/g)

V: volumen de solución (L)

W: dosis de adsorbente (mg)

3.8 Análisis Estadístico

Para evaluar los resultados obtenidos se desarrolló un análisis factorial de 3^4 empleando el programa IBM SPSS STATISTICS 22. El anterior análisis permite observar las diferencias estadísticas cuando se emplean una importante cantidad de repeticiones, tal como se desarrolla en este estudio.

Capítulo IV. Resultados y Discusión

4.1 Caracterización del Adsorbente

Después de haber pasado el tiempo necesario para la eliminación de la humedad en la materia orgánica, se comenzó a realizar diferentes mediciones, hasta llegar a un peso constante de la hoja de Bambú. El Cuadro 3 muestra los resultados obtenidos. Se observa que la remoción de humedad es proporcional a la pérdida del peso, para este estudio la pérdida de moléculas de agua que se encuentran retenidas dentro de la hoja de bambú se ubica alrededor de un 50%.

Cuadro 3: Eliminación de humedad en la materia orgánica

	Peso (gr)
Inicial	265
Final	113

La búsqueda de la eliminación de la propiedad de la humedad en las partículas se busca principalmente debido a que éstas interfieren en el proceso de adsorción; las moléculas de agua disputan con las moléculas del agente que se busca adsorber los espacios disponibles dentro de las partículas y para aumentar los sitios activos del adsorbente mejorando su capacidad de remoción (Atehortua y Gartner, 2013; Vega, 2018). La Fig. 9 muestra los dos diferentes tamaños de partículas obtenidas y utilizadas.



Fig. 9: Tamaño de partículas obtenidos

4.2 Adsorción de Cr⁺⁶ ante el Tratamiento sin Hidrólisis

Se describen los resultados alcanzados en la adsorción del metal pesado analizando cada una de las variables por separado con el tratamiento hidrólisis.

4.2.1 Efecto del tamaño de partícula ante la remoción

En la Fig. 10 se observa la capacidad de adsorción del Cr⁺⁶ con relación a los dos tamaños de partícula propuestos, para lo cual se realizó un promedio del porcentaje de adsorción de acuerdo a los tiempos establecidos de 1, 15, 30, 45 y 60 min, con biomasa de 25 y 50 mg. Los resultados manifiestan que se obtuvo un porcentaje de adsorción superior al 65%, sin considerar las concentraciones de Cr⁺⁶ presentes, el tamaño de partícula y la masa.

Por otra parte, el material adsorbente demostró tener un 84% de capacidad de adsorción a una concentración de 25 ppm con un tamaño de partícula de 0.595 mm, mientras que para concentración de 10 ppm se observó un 70% de adsorción al tamaño de partícula de 0.297. García (2014) menciona que el tamaño de las partículas es una variable que influye en gran medida en el proceso de la adsorción, dado que este proceso es mayormente eficiente en materiales de elevada superficie porosa considerando también la superficie externa de las partículas del adsorbente.

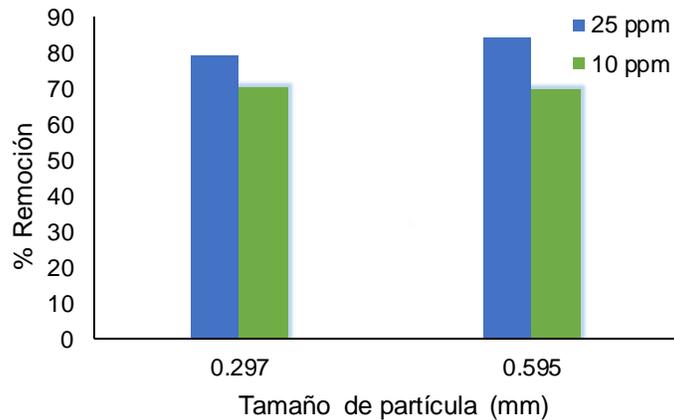


Fig. 10: Adsorción de Cr⁺⁶ a concentración 10 y 25 ppm

En el marco de referencia no se tienen estudios para realizar una comparación empleando la hoja de Bambú como bioadsorbente, sin embargo, existen otros tipos de biomásas empleadas para la remoción, con los cuales se puede contraponer.

El grado de adsorción de la biomasa de Bambú se encontró por debajo de lo cotejado en el estudio realizado por Netzahuatl-Muñoz *et al* (2010b), los cuales obtuvieron un 99.81% de adsorción utilizando cáscara de aguacate, cabe mencionar que se realizó el análisis con tamaños de partículas de 0.3 a 0.5 mm y concentraciones de 1 y 102 ppm, en cambio el presente estudio presentó una similitud de remoción a la obtenida por Netzahuatl-Muñoz *et al.* (2010a), donde a partir de corteza de árbol de Pirul (*Schinus molle*) removieron un 75% de Cr⁺⁶ utilizando concentraciones de 1 y 102 ppm empleando tamaño de partículas de 0.3 y 0.5 mm, por otra parte la capacidad de adsorción del bambú supero a la alcanzada por Campos-Medina (2008) quien en su investigación empleando como biomasa cáscara de Nopal (*Ectodermis de Opuntia*) consiguieron remoción inferiores al 52% con un tamaño de partícula de 0.4 mm y concentraciones de 24, 50, 75, 100 y 150 ppm, caso contrario del presente estudio.

4.2.2 Efecto del tiempo de contacto ante la remoción

Los porcentajes de remoción ante la variable tiempo (1, 15, 30, 45 y 60 min) muestran resultados por arriba del 60% sin considerar el tiempo de contacto, es de relevancia recalcar que en el lapso de 15 min se obtuvieron los más altos porcentajes de remoción para ambas concentraciones, teniendo un 88% para la concentración de 25 ppm, en cambio para 10 ppm se logró un 73% de esta adsorción, indicando que el tiempo óptimo para una remoción superior al 70% es un tiempo de 15 min, disminuyendo un poco las remociones durante el curso del experimento (Fig. 11).

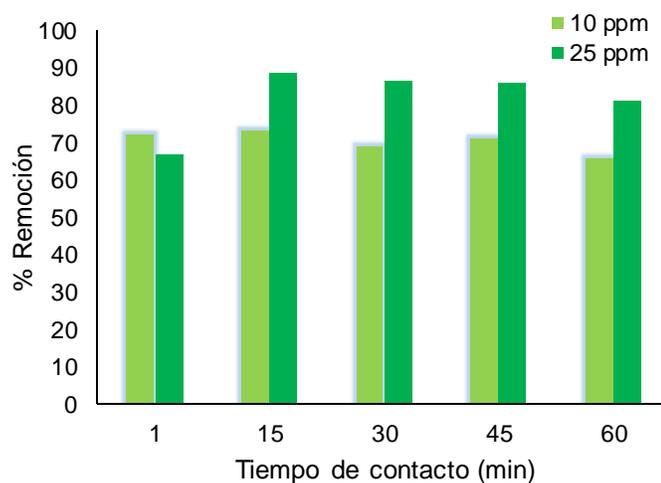


Fig. 11: Adsorción de Cr⁺⁶ ante el tiempo de contacto

Realizando una comparación con la literatura, la aplicación de Bambú como adsorbente se encontró inferior a las investigaciones cotejadas, considerando que el tiempo óptimo de remoción de este estudio es menor al utilizado por los siguientes autores: Cabrera (2017), donde empleó biomasa a partir de cáscara de tomate de árbol (*Solanum betaceum*) con concentraciones de 10 ppm, se obtuvo un porcentaje de adsorción del 80% con 90 min de tiempo de contacto, mientras que otro estudio

desarrollado por Acosta *et al.* (2012) emplearon una concentración de 100 ppm logrando una remoción del 100% en un tiempo de 50 min.

4.2.3 Efecto de la concentración en equilibrio ante la concentración inicial

Los resultados obtenidos por la relación entre la concentración en equilibrio e inicial demuestran una tendencia en la remoción de Cr^{+6} al incrementar las concentraciones evaluadas en el presente estudio. (Fig.12). Esta investigación presenta una capacidad de adsorción inferior al contrastarse con el trabajo realizado por Sarin y Pant. (2006) en el que utilizaron biomasa de la corteza de eucalipto (*Eucalyptus*) logrando una remoción del 99% a concentraciones de 200 ppm teniendo una linealidad favorable para la remoción.

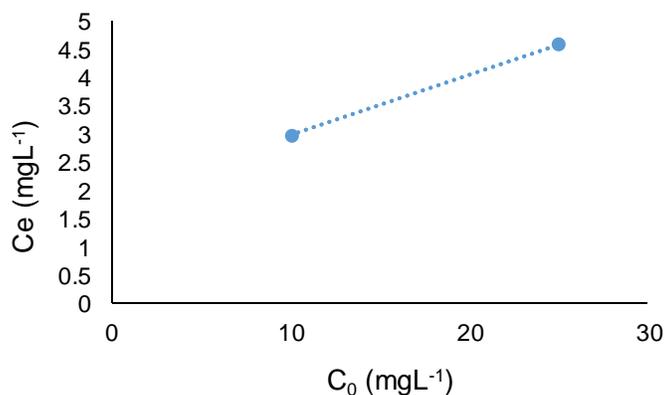


Fig. 12: Concentración en equilibrio con relación a la concentración inicial

4.2.4 Efecto de la concentración inicial Cr^{+6} ante la remoción

Los resultados obtenidos manifiestan un porcentaje alrededor de un 70% de adsorción para una concentración inicial de 10 ppm y un 81% para la concentración de 25 ppm (Fig. 13), lo cual evidencia una tendencia en el porcentaje de remoción al alza de las concentraciones iniciales ensayadas, estos resultados encuentran similitud al estudio presentado por González *et al.* (2009).

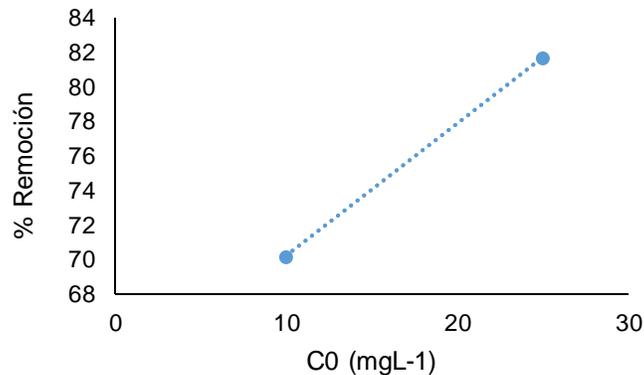


Fig. 13: Porcentaje de remoción en función a la concentración inicial

La biomasa dentro de este estudio presenta porcentajes de adsorción por debajo del análisis elaborado por Ali *et al.* (2016) con cáscara de plátano, los cuales obtienen un 80% de adsorción a una concentración de 400 ppm, pero al incrementar las concentraciones de Cr^{+6} obtienen una deficiencia en la capacidad de adsorción debido a la saturación en la superficie del área del adsorbente, por lo contrario en la biomasa en estudio esta problemática no se presenta, cabe resaltar que las concentraciones utilizadas se encuentran muy por debajo del anterior estudio. Comparando con Vargas-Nieto *et al.* (2011), donde se empleó compost a partir de residuos de cultivos vegetales, pasto, estiércol de ganado y suelo, alcanzaron un 96% de remoción con una concentración de 5 ppm pero presentó la problemática de remoción al realizar un aumento en las concentraciones iniciales, a su vez presenta una aproximación de la remoción al compararse al resultado conseguido por Krishnani *et al.* (2013) donde en su proyecto manejaron polímero como bioadsorbente reportando una remoción del 72% con una concentración inicial de 2.5 ppm.

4.3 Análisis estadístico

Después de haber obtenido los resultados antepuestos se realizó un análisis factorial para observar las diferencias existentes (Cuadro 4).

Cuadro 4: Análisis Factorial

Variable dependiente	Remoción			
	Origen	P	Sig. (p)	.α
Modelo corregido	2.424	.000	0.05	
Concentración	26.639	.000	0.05	
TP	1.244	.268	0.05	
Masa	.297	.587	0.05	
Tiempo	3.897	.006	0.05	
Concentración * TP	2.062	.155	0.05	
Concentración * Masa	.729	.396	0.05	
Concentración * Tiempo	3.947	.006	0.05	
TP * Masa	.733	.394	0.05	
TP * Tiempo	2.028	.099	0.05	
Masa * Tiempo	.724	.578	0.05	
Concentración * TP * Masa	.338	.562	0.05	
Concentración * TP * Tiempo	3.454	.012	0.05	
Concentración * Masa * Tiempo	.834	.508	0.05	
TP * Masa * Tiempo	.422	.792	0.05	
Concentración * TP * Masa * Tiempo	.285	.887	0.05	

R²= .548 R² ajustada = .322

TP=Tamaño de partícula

Se demuestra que de acuerdo al modelo corregido las variables propuestas son aceptables para la adsorción del Cr^{+6} . Observando que las variables de masa ($p=0.587$), tamaño de partícula ($p=0.268$) indican que no demuestran una influencia en la adsorción, mientras que el tiempo ($p=0.006$) tiene una influencia en este proceso de adsorción.

Por el contrario, al interaccionar la mayoría de las variables comparadas con el valor de $\alpha=0.05$, se encuentran por arriba indicando que no influyen, los resultados mostrados de color amarillo presentan una influencia en la adsorción del Cr^{+6} .

4.4 Adsorción de Cr^{+6} ante el Tratamiento con Hidrólisis

En el presente trabajo se realizó modificación química a las partículas de la biomasa, utilizando NaOH, a continuación se muestran los resultados obtenidos ante la hidrólisis básica ante las variables de partícula y tiempo de contacto para comparar la efectividad de remoción.

4.4.1 Efecto del tamaño de partícula ante la remoción con hidrólisis

En la Fig. 14 se observan los porcentajes de remoción alcanzados por la biomasa, sin considerar el efecto de la variable se demuestra que el bioadsorbente al cual se le realizó una hidrólisis básica, presentó porcentajes de remoción entre el 20% a 65% y los mejores resultados de remoción se tuvieron con una concentración de 10 ppm, para el tamaño de partícula de 0.297 mm presentó una adsorción de 52% y un 66% para la partículas de 0.595 mm.

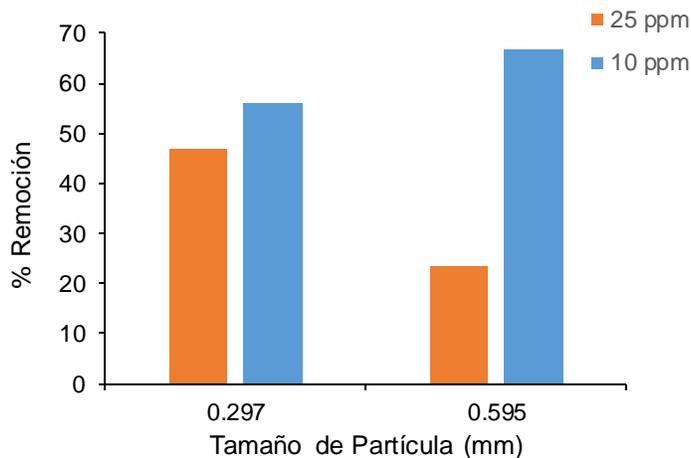


Fig.14: Remoción de Cr⁺⁶ ante tamaños de partícula

Esta investigación presenta un porcentaje de remoción inferior al ser cotejada con Eggs *et al.* (2012) emplearon cáscara de arroz modificada con ácido fosfórico, 6 g del bioadsorbente y 10 ppm de Cr⁺⁶ obteniendo un 100% de remoción, por otro lado supera lo alcanzado por Garcés y Coavas (2012), donde utilizaron cáscara de naranja modificada con quitosano, con concentración de 6 gL⁻¹ y un tamaño de partícula de 0.425 mm lo cual permitió alcanzar un 61% de remoción

Al ser comparados los resultados con los del apartado 4.2 del presente estudio, se comprueba que al realizar una modificación química (al adsorbente y que para ambos tamaños de partículas los porcentajes de remoción alcanzados no son los aptos para una remoción efectiva, debido a que se presentaron porcentajes inferiores al 50 % para la concentración de 25 ppm en ambas tamaños de partículas y ante la concentración los resultados están por abajo del 68%.

4.4.2 Efecto del tiempo de contacto ante la remoción con hidrólisis

Ante la variable del efecto de tiempo de contacto los mejores resultados de remoción se obtuvieron en un tiempo de 45 min para el caso de la concentración de 25 ppm con un 68%, mientras que para la concentración de 10 ppm se logró un 49% al tiempo de 60 min (Fig. 15).

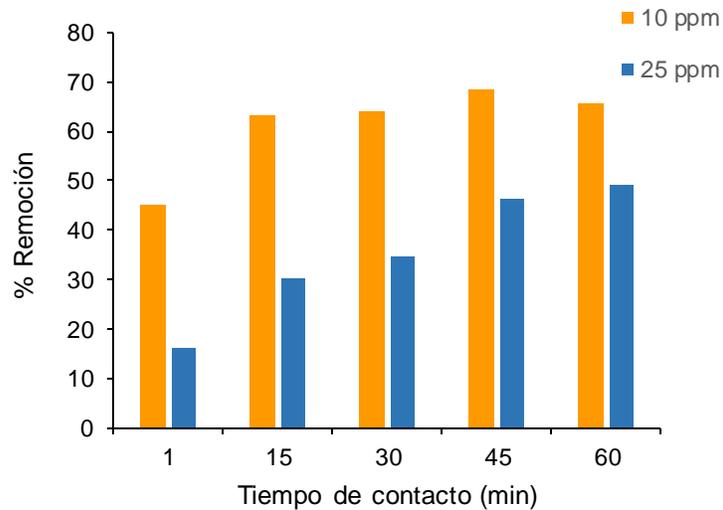


Fig.15: Remoción de Cr⁺⁶ ante tiempo de contacto

Los resultados anteriores manifiestan que las partículas de hoja de bambú modificadas no permiten alcanzar una remoción eficiente en menores tiempos de contacto, en contraste el bioadsorbente sin modificación alcanza remociones por arriba del 70% a tiempo de 15 min.

Por otra parte presentan una remoción inferior al ser comparados con Ali et al. (2016) los obtuvieron un porcentaje de adsorción del 80% con un tiempo óptimo de 120 min, donde la biomasa fue a partir de cáscara de plátano modificada con ácido clorhídrico (HCl) y con concentración de Cr⁺⁶ a 400 ppm, en cambio Tejeda *et al.* (2017) utilizaron cáscara de cacao modificada con NaOH y 100 ppm de Cr⁺⁶ teniendo una remoción por arriba del 75% a un tiempo de 270 min.

Capítulo V. Conclusiones

En la literatura se reportan una amplia gama de adsorbentes de Cr^{+6} a base de materia orgánica como una alternativa en pro del medio ambiente. Las partes de las plantas más analizadas son: raíz, hojas, tallo, corteza o cáscaras de los frutos, a partir de las cuales se han extraído los adsorbentes debido a que contienen esencialmente polisacáridos de alto peso molecular y compuestos proteínicos usados para la remediación de aguas residuales contaminadas con iones de metales pesados. Para lo cual en este trabajo se empleó la hoja de Bambú, a partir de los resultados experimentales se determinó que para obtener una eficiencia por arriba del 50% de remoción de iones Cr^{+6} la hoja de Bambú no requiere de una modificación química, por otra parte la cinética debe realizarse en un medio acuoso ácido, temperatura a medio ambiente y tiempo de contacto de 15 min.

En la presente investigación el adsorbente de hoja de Bambú sin modificación química mostró una capacidad máxima de remoción del Cr^6 de un 84% con un tamaño de partícula de 0.595 mm y una concentración de 25 ppm y un 70% de remoción con partícula de 0.297 mm y concentración de 10 ppm, por lo cual se puede concluir que a mayor tamaño de partícula y concentraciones superior se puede obtener un porcentaje de adsorción elevado.

La biomasa analizada tiene la capacidad de remover eficientemente Cr^{+6} en solución, y es por esta característica que puede ser usada en la descontaminación de efluentes industriales conteniendo dicho metal, además de que la biomasa proviene de residuo de jardinería, fácil de transportar, fácil de obtener en grandes cantidades. Por lo que la aplicación de esta tecnología presenta mucho potencial para poder seguir investigando.

Capítulo VI. Bibliografía

- Acosta, I., Cárdenas, J. F., Alvarado-Hernández, D. y Moctezuma-Zárate, M. G. (2008). Remoción de cromo (VI) en solución acuosa por la biomasa celular de *Paecilomyces sp.* *Información Tecnológica*, 19(1): 69-74.
- Acosta, I., López, V. y Coronado, E. (2010). Remoción de Cromo (VI) en solución acuosa por la biomasa de la cáscara de tamarindo (*Tamarindus indica*). *Revista de La Sociedad Mexicana de Biotecnología Y Bioingeniería A.C.*, 14(3): 11–23.
- Acosta R. I., Cárdenas G. J. F. y Martínez J. V.M. (2012a). El uso de diferentes biomásas para la eliminación de metales pesados en sitios contaminados. *Ideas@s CONCYTEG*, 7(85): 911–922.
- Acosta, I., Sandoval, P., Bautista, D., Hernández, N., Cárdenas, J. y Martínez, V. (2012b). Biadsorción de cromo (VI) por la cáscara de Mamey (*Mammea americana L.*). *Avances En Ciencias E Ingeniería*, 3(2): 1–9.
- Adarve, M. y Rebollo, L. (1993). Incidencia ambiental de un vertedero sellado de residuos sólidos localizado en Móstoles (Madrid) sobre la composición natural de las aguas subterráneas. *Geogaceta*, 13: 3–6.
- 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 amarga (*Manihot esculenta*). *Prospect*, 6: 64–70.
- Ali, A., Saeed, K. y 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.
- Alvarez, S.G., Maldonado, M, Gerth, A, y Kusch, P. (2004). Caracterización de Agua Residual de Curtiduría y Estudio del Lirio Acuático en la Recuperación de Cromo. *Información tecnológica*, 15(3): 75-80.
- Arango, R. A. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1):49-56.
- Armijo, F., De Michele, D., Giacomino, M., Belderrain, A., Corvillo, I. y Maraver, F. (2008). Análisis de las aguas minerales de la provincia de Entre Ríos, Argentina. *ResearchGate*, 32(1): 56–60.
- Atehortua, E. y Gartner, C. (2013). Estudios preliminares de la biomasa seca de *eichhornia crassipes* como adsorbente de plomo y cromo en aguas. *Revista Colombiana de Materiales*, (4): 81-92.
- Atilo de la Orden, E. (2010). Contaminación. *Editorial Científica Universitaria-Universidad Nacional de Catamarca, Argentina*: 1-34.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). (2011). Chromium. <https://www.atsdr.cdc.gov/substances/toxsubstance.asp?toxid=17>
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). (2015). Public health statement mercury. <https://www.atsdr.cdc.gov/phs/phs.asp?id=112&tid=24>.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). (2016). Plomo (Lead).

https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs13.html.

ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). (2016). Cromo (Chromium). https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs7.html

Ávila-Pérez, P. y Zarazúa-Ortega, G. (1993). Concentración de metales pesados en ostiones (*Crassostrea virginica* Gmelin), del canal El Chijol, Veracruz, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 9(2): 53–64.

Ávila-Pérez, P. y Zarazúa-Ortega, G. (1993). Concentración de metales pesados en ostiones (*Crassostrea uirginica* Gmelin), del Canal el Chijol, Veracruz, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 9(2): 53-64.

Avila, R. M., Cárdenas, A. y Medina, A. L. (2000). Tratamiento del lactosuero utilizando la técnica de electrodiálisis. *Interciencia*, 25(2): 80–84.

Barceló, J., Poschenrieder, C., y Guensé, B. (1987) El impacto del cromo en el medio ambiente. II El Cr en los organismos vivos. *Circular Farmacéutica*, 293: 31-48.

Beltrán, M. E.P. y Gómez, A. M.R. (2015). Metales pesados (Cd, Cr y Hg): su impacto en el ambiente y posibles estrategias biotecnológicas para su remediación. *Revista I3+*, 2(2): 83–90.

Benavente, M., Sjören. A y Martínez, J. (2007). Remoción de mercurio de efluentes mineros por biosorción : un caso de estudio en la ciudad de la Libertad, Chontales , Nicaragua. *Resvista Científica Nexo*, 20(2): 47–55.

Bermejo, C. D. F. (2016). Remoción de plomo y cadmio presente en aguas residuales mineras mediante biosorción en columnas con bagazo de caña y cáscara de cacao. *Tesis de Licenciatura en Ciencias*. Universidad de Cuenca, Ecuador: 1-116.

Bermudez, M. (2010). *Contaminacion y turismo sostenible*. CETD SA:4-25.

Bravo-Inclán, L., Saldaña-Fabela, P., Izurieta-dávila, J. y Mijangos-Carro, M. (2013). La importancia de la contaminación difusa en México y en el mundo: 1-10.

Bravo, M. A. G. (2017). Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales. *Tesis de Licenciatura en Ciencias*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia: 1-101.

Cabrera, A. L. F. (2017). Bioadsorción de iones de plomo y cromo procedentes de aguas residuales utilizando la cáscara del tomate de árbol (*Solanum betaceum*). *Tesis de Licenciatura*. Universidad de Politécnica Salesiana de Cuenca, Ecuador: 1-172.

Calva, C. L. F. (2015). Diseño de un modelo de vivienda ecológica con bambú para la zona rural de Yantzaza. *Tesis de Licenciatura en Ciencias*. Universidad Nacional de Loja, Ecuador: 1-206.

Cantillanez, M., Avendaño, M., Thouzeau G. y Le pennec, M. (2005) Reproductive cycle of *Argopecten purpuratus* (Bivalvia:Pectinidae) in La Rinconada marine reserve (Antofagasta, Chile): Response to environmental effects of El Niño and La Niña. *Aquaculture*, 246 (1-4): 181-195.

Campos, M. E (2008). Estudio de la adsorción de cromo hexavalente como biomaterial la *Ectodermis de opuntia*. *Quivera*, 10(1): 16-31.

Cañizares-Villanueva, R.O. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa

- microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 42(3): 131–143.
- Cárdenas-González, F. J y Acosta-Rodríguez, I. (2011). Remoción de cromo hexavalente por el hongo *Paecilomyces sp.* Aislado del medio ambiente. *Información Tecnológica*, 22(1):9-16.
- Cardona, A. F.G., Cabañas, D. D.V. y Zepeda, A. P. (2013). Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados , Pb (II) y Zn (II). *Ingeniería*, 17(1): 1–9.
- Carmioli, U. V. (2009). Bambú Guada: un recurso ecológico. *Tecnología en Marcha*, 22(3): 3-9.
- Carro, L. M. de D. (2012). Eliminación de mercurio de efluentes acuosos con materiales de bajo costo: proceso combinado de adsorción-reducción. *Tesis Doctoral en Ciencias*. Universidad de La Coruña, España: 1-142.
- Castro, J. D. (2011). Informe sobre el mercado del mercurio en México. *Comisión Para La Cooperación Ambiental*:12–14.
- Castro, J. D. (2013). Evaluación de los suministros de mercurio primario y secundario en México. *Comisión Para La Cooperación Ambiental*: 7–8.
- Castro, J. y Díaz, M. L. (2004). La contaminación por pilas y baterías en México. *Gaceta Ecológica*:53–74.
- Caviedes, D. I.R., Muñoz, R. A.C., Perdomo, A. G., Rodríguez, D. A. y Sandoval, I. J.R. (2015). Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. *Revista Ingeniería y Región*, 13(1): 73–90.
- CENAM. (2012). Guía técnica sobre trazabilidad e incertidumbre en las mediciones químicas que emplean las técnicas de espectrofotometría de absorción atómica y de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente. México: 1-69.
- Chávez, S. M. J. (2010a). Evaluación de Riesgo por la presencia de contaminantes en agua destinada al uso y consumo humano del acuífero del Valle del Guadiana. *Tesis de Maestría en Ciencias*. Instituto Politécnico Nacional, Durango: 1-104
- Chávez, P. A. (2010b). Descripción de la nocividad del cromo proveniente de la industria curtiembre y de las posibles formas de removerlo. *Revista de Ingenierías Universidad de Medellín*, 9(17): 41-50.
- Cjuno, J. H. y Zegarra, M. P. (2012). Preconcentración de Zn(II) con el intercambiador catiónico PS-DVB-SO₃H con monitoreo de pH y análisis de recuperación de los eluidos por absorción atómica (EAAF). *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 15(1): 15-20.
- Cobos, O. F. H., Cataño, D. L. y Hernández, H. E. (2005). Reducción del cromo contenido en efluentes líquidos de la industria del cuero, mediante un proceso adsorción-desorción con algas marinas. *Scientia et Technica*, 3(29): 115-120.
- Cobos, O. F. H., García, L. C. F. y Londoño, J. F. A. (2009). Estudio de la biosorción de cromo con hoja de café. *Ingeniería e Investigación*, 29(2): 59-64.
- Coedo, A. G. y Dorado, M.T. (2010). Resolución espacial en la ablación láser acoplada a la espectrometría de masas con fuente de plasma de acoplamiento inducido. *Revista de Metalurgia*, 46(1): 1-17.

- Collazo, M. P.C. y Montañó, J. X. (2012). Manual de agua subterránea. Montevideo, Uruguay: 1-93.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2016). 27 años Conagua , nuestra huella en la historia. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/27-anos-conagua-nuestra-huella-en-la-historia>
- Correa, F. G., Gómez, J. S. y Martínez, J. B. (2010). Síntesis y caracterización de materiales inorgánicos para ser empleados como adsorbentes de metales tóxicos y de interés nuclear. *Contribuciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares al avance de la Ciencia y la Tecnología en México*. Edición conmemorativa 2010: 1-17.
- Cortés, R. G. R. (2000). Los bambúes nativos de México. *CONABIO BIODIVERSITAS*: 1-4.
- Covarrubias, S. A. y Peña, J. J. C. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33: 7–21.
- Cuberos, E., Rodríguez, A. I., y Prieto, E. (2009). Niveles de cromo y alteraciones de salud en una población expuesta a las actividades de curtiembres en Bogotá, Colombia. *Revista de salud pública*, 11: 278-289.
- Dimas, G. L. 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: 1-87.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (1996). Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Norma Oficial Mexicana 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.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2002). Secretaría de Salud. Norma Oficial Mexicana NOM-185-SSA1-2002, Productos y servicios. Mantequilla, cremas, producto lácteo condensado azucarado, productos lácteos fermentados y acidificados, dulces a base de leche. Especificaciones sanitarias: 32-67.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2010) Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Decreto por el que se expropia la superficie de 35, 344.13 m², ubicada en la calle Francisco I.Madero número 30, colonia Lechería, en el Municipio de Tultitlán, estado de México. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5171645&fecha=17/12/2010
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2014). Secretaría de Economía, Norma Mexicana NMX-AA-044-SCFI-2014, Análisis de agua-medición de cromo hexavalente en aguas naturales, salinas, residuales y residuales tratadas-método de prueba: 1-15.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2016). Secretaría de la Contraloría General de Federación. *Norma mexicana NMX-AA-051-SCFI-2016* Análisis de agua-Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, método de prueba: 6-44.
- Doria, G. M.H., Paz, P. A.O. y Hormaza, A. A. (2013). Estandarización de la difenilcarbazida como indicador y acomplejante en la identificación de cromo hexavalente–Cr (VI). *Producción + Limpia*, 8(2): 9–20.
- Duarte R. E., Olivero Verbel, J. y Jaramillo C. B.E. (2009). Remoción de cromo de aguas residuales de curtiembres usando quitosano obtenido de desechos de camarón. *Scientia et Technica*, 2(42): 290–295.

- Duffus, J. H. (2002). "Heavy metals"-A meaningless term?, *74*(5): 793–807.
- Eggs, N., Salvarezza, S., Azario, R., Fernández, N. y García, M. D. C. (2012). Adsorción de cromo hexavalente en la cáscara de arroz modificada químicamente. *Avances en ciencias e ingeniería*, 3(3), 141-151.
- Francisca, F. M. y Carro, P. M.E (2014). Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(2): 177-190.
- Garces, J. L. E. y Coavas, R. S. C. (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 de Licenciatura*. Universidad de Cartagena, Colombia: 1-129.
- García, S. N. (2014). Una nueva generación de carbones activados de altas prestaciones para aplicaciones medioambientales. *Tesis de Doctorado*. Universidad de Oviedo, España: 1-217.
- García-Nieto, E., Carrizales-Yañez, L., Juárez-Santacruz, L., García-Gallegos, E., Hernández-Acosta, E., Briones-Corona, E. y Vázquez-Cuecuecha, O. G. (2011). Plomo y Arsénico en la subcuena del alto, Atoyac en Tlaxcala, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 17(1): 7–17.
- García, S. M. (2015). Bambú como material estructural: generalidades , aplicaciones y modelización de una estructura tipo. *Tesis de Doctoral en Ciencias*. Universidad Politécnica de Valencia: 1-52.
- Giardina, E. B., Heredia, O. S., Castro, M. A y Efron, D.N. (2012). Fitotoxicidad del cromo sobre *Phaseolus vulgaris* L. *Revista Agronomía y Ambiente*, 32(1-2): 75-80.
- Gomez, R. V. E., Velásquez, J. J. A. y Quinata, M. G. C. (2013). Lignina como adsorbente de metales pesados. *Revista Investigaciones Aplicadas*, 7(2): 74-85.
- Gómez-Álvarez, A., Villalba-Atonio, A., Acosta-Ruiz, Castañeda-Olivares, y Kamp, D. (2004). Metales pesados en el agua superficial del Río San Pedro durante 1997 y 1999. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 20(1): 5–12.
- González, O. D., Gómez-Bernal, J. M. y Ruiz-Huerta, A. E. (2012). Plants and soil contamination with heavy metals in agricultural areas of Guadalupe, Zacatecas, Mexico. *INTECH*: 37–49.
- Guohua, C., Xueming, C. and Po. L. Yue. (2000). Electrocoagulation of restaurant wastewater. *Journal of Environmental Engineering*, 126: 858-863.
- Gutiérrez, M.C. y Droguet, M.(2002). La cromatografía de gases y la espectrometría de masas: identificación de compuestos causantes de mal olor. *Boletín intexter*, 122: 35-41.
- Guohua, C. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38: 11-41.
- Henríquez, C. H. (2013). Métodos automáticos para la determinación de parámetros de interés ambiental. *Tesis Doctoral en Ciencias*. Universitat de les Illes Balears, España: 1-261.
- Hernández, C.L.A.(2017). Reducción fotocatalítica de Cr⁶ en presencia de luz visible y CdS sintetizado por método novedoso. *Tesis Maestría en Ciencias*. Instituto Politécnico Nacional, México: 1-143.
- IAEA, (International Atomic Energy Agency). (2013). Protección de nuestro medio marino. *IAEA*

- IUPAC, (International Union of Pure and Applied Chemistry). (1995). Nomenclatura para cromatografía. Madrid, España: 13-84.
- Izquierdo, M. S. (2010). Eliminación de metales pesados en aguas mediante bioadsorción, evaluación de materiales y modelación del proceso. *Tesis Doctoral en Ciencias*. Universidad de Valencia, España: 8-300.
- Kastenmayer, P. (1997). Análisis de minerales y elementos traza en alimentos. En Morón, C., Zacarías, I., Saturdino de Pablo (Ed). Producción y manejo de composición química de alimentos en nutrición, FAO, Chile: 1-24.
- Krishnani, K. K., Srinives, S., Mohapatra, B. C., Boddu, V. M., Hao, J., Meng, X., y Mulchandani, A. (2013). Hexavalent chromium removal mechanism using conducting polymers. *Journal of Hazardous Materials*: 99–106.
- Leyva, R. R., Medellín, C.N.A., Guerrero, C.R.M., Berber, M.M.S, Aragón, P.A y Jacobo, A.A (2005). Intercambio iónico de Plata (I) en solución acuosa sobre clinoptilolita. *Revista Internacional de contaminación ambiental*, 21(4): 193-200.
- Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T. y Muñoz García, F. G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Bioteología en el Sector Agropecuario Y Agroindustrial*, 14(2): 145-153.
- Lorenzo, M., Reyes, A., Blanco, I. y Vasallo, M. del C. (2010). Determinación de Ca, Cu, Fe y Pb por espectrofotometría de absorción atómica en aguardientes de caña. *ICIDCA*. Sobre los derivados de la caña de azúcar, 44(3): 3–6.
- Maldonado, J. M. (2009). Ciudades y contaminación ambiental. *Revista de Ingeniería*, (3): 66–71.
- Mancilla-Villa, Ó. R., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Uscanga-Mortera, E., Ramos-Bello, R. y Reyes-Ortigoza, A. L. (2011). Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(1): 39-48.
- Maron, S. H., y Prutton, C. F. (2002). Fundamentos de fisicoquímica. EDITORIAL LIMUSA, S.A. DE C.V.: 1-803.
- Martínez, G. S. (2015). Bambú como material estructural: generalidades, aplicaciones y modelización de una estructura tipo. *Trabajo Fin de Grado*. Universidad Politécnica de Valencia, España: 1-52
- Méndez, N. R., Novelo, L.A., Coronado, P. V., Castillo, B.E. y Sauri, R. .M. R. (2008). Remoción de materia orgánica y metales pesados de lixiviados por flotación con aire disuelto. . *Revista Ingeniería*, 12(1): 13-19.
- Méndez, R. I. N., Castillo, E. R. B., Suri, M. R. R., Quintal, C. A. F., Giácoman, G. V. y Jiménez, B. C. (2009). Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(3): 133–145.
- Méndez-García, T., Rodríguez-Dominguez, L. y Palacios-Mayorga, S. (2000). Impacto del riego con aguas contaminadas, evaluado a través de la presencia de metales pesados en suelos. *Terra*, 18 (4): 277–288.
- Menchaca, L. D. N. (2015). Aislamiento e identificación de bacterias metalófilas resistentes a cromo

hexavalente con potencial aplicación en procesos de biorremediación. *Tesis de Maestría en Ciencias*. Universidad Autónoma de Nuevo León: 1:152.

- Mestanza, M. M. (2012). Estudio de materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes. *Tesis Doctoral en Ciencias*. Universidad Complutense de Madrid: 1-318
- Mollah, M. Y. A., Schennach, R., Parga, J. R. and Cocke, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC)-science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84(1): 29-41.
- Molina, C.A. (2013). Validación de las técnicas para determinación de molibdeno y cromo en agua residual, tratada, cruda y de níquel en agua residual mediante espectrometría de absorción atómica por llama directa para el laboratorio de análisis de aguas y alimentos UTP. *Tesis de Licenciatura en Ciencias*, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia: 1-149.
- Moreno, M. L y Guerrero, D J.A. (2002). Validación de una metodología multiresiduo para la determinación de residuos de plaguicidas en repollo (*Brassica Oleracea* *vr. Capitata*). *Revista Colombiana de Química*, 31(1): 19-32.
- Moreno-Bonett, C., Zugazagoitia-Herranz, R., Sánchez-Martínez, C., Córdoba-Moreno, R. y Melo-Ruiz, V. (2012). Determinación de metales pesados en el agua de un canal de Xochimilco (México, D.F.) como proyecto de servicio social. *Educacion Quimica*, 23(3): 375–382.
- Navarro, A. E., Ramos, K. P., Campos, K. y Maldonado, H. J. (2006). Elución del efecto del pH en la adsorción de metales pesados mediante biopolímeros naturales: cationes divalentes y superficies activas. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 7(2):113–126.
- Netzahuatl-Muñoz, A. R., Cristiani-Urbina, M. C. y Cristiani-Urbina, E. (2010a). Estudio cinético de la remoción de cromo hexavalente y de cromo total por la corteza del árbol del pirul. *Revista Cubana de Química*, 13(3): 3–8.
- Netzahuatl Muñoz, A. R., Pineda-Camacho, G., Barragán-Huerta, B. E. y Cristiani-Urbina, E. (2010b). Evaluación de la cáscara del aguacate para la remoción de cromo hexavalente y cromo total de soluciones acuosas. *Revista de Ciencias Químicas*, 41: 1–10.
- Novotny, V. (1999). Diffuse pollution from agriculture-A worldwide outlook. *Elsevier Science Ltd*, 39(3): 1–13.
- Ordóñez-Candelaria, V. R. y Bárcenas-Pazos, G. M. (2014). Propiedades físicas y mecánicas de tres especies de guaduas mexicanas (*Guadua aculeata*, *Guadua amplexifolia* y *Guadua velutina*). *Madera y bosques*, 20(2):111-125.
- Orozco, H. J. y Toro, B. A. M. (2007). Determinación de la concentración letal media (CL_{48}^{50}) del cromo y el cobre por medio de bioensayos de toxicidad acuática sobre *Daphnia pulex*. *Tesis de Licenciatura en Ciencias*. Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia: 1-164.
- Ortiz, N. E. y Carmona, J. C. (2015). Aprovechamiento de cromo eliminado en aguas residuales de certidumbres (San Benito, Bogotá), mediante tratamiento con sulfato de sodio. *Revista Luna Azul*, (40): 117–126.
- OSHA (Occupational Safety and Health Administration). Regulations (Standards-29 CFR).https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=10030
- Patíño, Y., Díaz, E. y Ordóñez, S. (2014). Microcontaminantes emergentes en aguas: tipos y

sistemas de tratamiento. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 5(2): 1-20.

- Patnaik, P. (2010). Handbook of environmental analysis: chemical pollutants in air, water, soil, and solid wastes. *LLCCRC Press*. EE.UU: 3-771.
- Pavlovska, G., Čundeve, K., Stařilov, T. y Zendelovska, D. (2003). Flotation method for selective separation of silver, cadmium, chromium, manganese, thallium, and zinc from aragonite before atomic absorption spectrometric determination. *Separation science and technology*, 38(5): 1111-1124.
- Peña, C. E., Carter, D. E., y Ayala-fierro, F. (2001). Toxicología Ambiental, Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental. Distributed on the Internet via the Southwest Hazardous Waste Program website at <http://superfund.pharmacy.arizona.edu/toxamb/>.
- Peña, A., Morales, J., Labastida, C. y Capella, S.(2003). Extracción en fase sólida como una alternativa para el procedimiento de limpieza en la determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos por cromatografía de gases: aplicación a organismos marinos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 19(1):13-23.
- Peredo, E. N. (2010). Contaminación del agua en la región del Maule y Biobío. *Revista Internacional de Ambiente y Turismo*, 6: 61–68.
- Pérez, R. (2001). Porcicultura y contaminación del agua en la Piedad, Michoacán, México. *Revista Internacional Contaminación Ambiental*, 17(1): 5–13.
- Pérez-García, N., Rueda-González, M., Rojo-Martínez, G. E., Martínez-Ruíz, R., Ramírez-Valverde, B., y Juárez-Sánchez, J. P. (2009). El bambú (*Bambusa spp.*) como sistema agroforestal: una alternativa de desarrollo mediante el pago por servicios ambientales en la Sierra Nororiental del estado de Puebla. *Ra Ximhai*, 5(3): 35-346.
- Pérez-Moreno, F., Prieto-García, F., Rojas-Hernández, A., Marmolejo-Santillán, Y., Salinas-Rodríguez, E. y Patiño-Cardona, F. (2006). Estudio de eliminación de arsénico con resinas de intercambio iónico en agua potable de Zimapán, Estado de Hidalgo, México. *Revista de metalurgia*, 42(5): 391-395.
- Pinzón-Bedoya, M. L. y Vera, L. E.V. (2009). Modelamiento de la cinética de bioadsorción de Cr (III) usando cáscara de naranja. *Dyna*, 160(3): 96–105.
- Piña, X., Lué-Merú, M. P., Poleo, G., Rojas, J. y Torres, G. (2012). Optimización de un método analítico para la determinación de mercurio en muestras ambientales por espectrometría UV-visible. *Avances En Química*, 7(3): 171–180.
- Piña-Soberanis, M., Martín-Domínguez, A., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Guevara-Lara, A. y García-Espinoza. (2011). Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(2): 257-271.
- Pohl, C. (2016). Use of ion chromatography for monitoring ionic contaminants in water. *Chemistry and Water: The Science Behind Sustaining the World's Most Crucial Resource*. Elsevier Inc: 353-391.
- PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente). (2018). Persiste clausura impuesta a la empresa Química Central de México S.A DE C.V.: PROFEPA. <https://www.gob.mx/profepa/prensa/persiste-clausura-impuesta-a-la-empresa-quimica-central-de-mexico-s-a-de-c-v-profepa>

- Quijano, P. A., Quijano, V. M. J., y Henao, M. J. A (2010). Caracterización fisicoquímica del material particulado fracción respirable PM_{2.5} en Pamplona-Norte de Santander-Colombia. *Revista Bistua*, 8(1): 53-66.
- Quiñones, É., Tejeda, C. y Ruíz, V. (2014). Remediación de aguas contaminadas con cromo utilizando diferentes biomateriales residuales. *Revista Ciencias E Ingeniería al Día.*, 9(1): 25–42.
- Ramírez-Gonzalez, S., Jiménez-Prieto, Y., Esperanza-Pérez, G., Ribalta-Quesada, J. A. y Rodríguez-Rivero, R.A. (2017). Determinación de arsénico por el método del azul de molibdeno en muestras de aguas provenientes de una planta de procesamiento de minerales auríferos. *Revista Cubana de Química*, 29(1): 3–12.
- Ramos, R. (1999). La contaminación ambiental. *Industrial Data*, 2(1): 51–54.
- Recasens, L. E. (2006). Valoración urinaria del cinc y cromo en la Diabetes Mellitus. *Tesis de Doctorado en Ciencias*. Universidad de Autónoma de Barcelona: 1:293.
- Restrepo, O. H. A.(2009). Evaluación del proceso de coagulación-floculación de una planta de tratamiento de agua potable. *Tesis Doctoral en Ciencias*. Universidad Nacional de Colombia: 1-109.
- Reyes, M. G. y Barreto, L. (2011). Efecto de la materia orgánica del suelo en la retención de contaminantes. *Revista Épsilon*, (16): 31–45.
- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M. y González, E. E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería Investigación Y Desarrollo*, 16(2): 66–77.
- Rodríguez, M. R. M., Galicia, S. L., Sánchez, W., Gómez, M. L., Zarco, A. A. E. y Ceccon, E. (2010). Usos actuales, distribución potencial y etnolingüística de los bambúes leñosos (bambuseae) en México. En Pochettino, M. L., Ladio, A. H. y Arenas, P. M (Ed). *Tradiciones & transformaciones en Etnobotánica, CYTED*, Argentina: 1-19.
- Rodríguez, Y. M., Salinas, L. P., Ríos, C. A. y Vargas, L. Y. (2012). Adsorbentes a base de cascarilla de arroz en la retención de cromo de efluentes de la industria de curtiembres. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 1(1): 146-156.
- Rodríguez, H. D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. *MEDISAN*, 21(12): 3372-3385.
- Romero, F. M. y Corrales-Pérez, D. (2013). Evaluación de la peligrosidad de jales de zonas mineras de Nicaragua y México y alternativas de solución. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(3): 427–446.
- Rosero, V. D. E (2017). Fundamento y aplicaciones de sistemas de especiación con "Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente" (LC-ICP-MS y GC-ICP-MS). *Tesis de Licenciatura en Ciencias*, Pontificia Universidad Católica del Ecuador: 1-104.
- Salas Enriquez, B. G. (2016). Biorremediación de suelo y tratamiento de lixiviados con carbón activado de Bambú del Ex-basurero a cielo abierto el Zapote. *Tesis Doctoral en Ciencias*. Instituto Politécnico Nacional, Altamira, Tamaulipas: 1-118.
- Salazar, M. A., Lizano, O. G. y Alfaro. E. J. (2004). Composición de sedimentos en las zonas costeras de Costa Rica utilizando fluorescencia de Rayos-X (FRX). *Revista de Biología*

Tropical, 52(2): 61-75.

- Sánchez, J. y Cameselle, C. (2016). Materiales sólidos residuales como adsorbentes. *AFINIDAD*, 74(577):18–24.
- Sarin, V. y Pant, K. K. (2006). Removal of chromium from industrial waste by using eucalyptus bark. *Bioresource Technology*, 97(1), 15–20.
- Sepúlveda, L. R. (1999). La contaminación ambiental, antecedentes, actividades y noticias. Ministerio de Educación, Programa de Educación Ambiental y coordinador P.J. Morales, Coordinador. Santiago, Chile: 3-84.
- Severiche S, C. y González G, H. (2013). Verificación analítica para las determinaciones de cromo hexavalente en aguas por espectrofotometría. *Ingenierías USBmed*, 4(1): 22-26.
- Sobrino-Figueroa, A., Cáceres-Martínez, C., y Rosas-Cedillo, R. (2007). Evaluación del riesgo por consumir moluscos contaminados con cadmio, como y plomo. *Hidrobiológica*, 17; 49-58.
- Somasundaran, P. and Krishnakumar, S. (1997). Adsorption of surfactants and polymers at the solid-liquid interface. *Colloids and Surfaces A: physicochemical and engineering aspects*, 123: 491-513.
- Soto, E. R., Lozano, T. R., Barbarín, J. M. C. y Alcalá, M. R. (2004). Remoción de metales pesados en aguas residuales mediante agentes químicos. *Ingenierías*, 7(23): 46–51.
- Souza, S. E., Moreira, G. E., Silva, F. R., Santos, S. A. y Pereira, M. E. (2013). Espectrometría de fluorescência de raios-x na determinação de espécies químicas. *Enciclopedia Biofera*, 9(17): 3413-3432.
- Spiegel, J. y Maystre, L. Y. (Mager, S. J) (2001). Control y prevención de la contaminación ambiental. In Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica, Spiegel, J., y Maystre, L. Y.(eds). Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. *Gestión editorial Chantal Dufresne*, BA: 55.2.
- Sposito, G. (2008). The Chemistry of Soils. Sposito, G. The Chemistry of Soils. 2nd Ed. Oxford University Press, New York: 330.
- Srinivasan, K. (2017). Ion chromatography instrumentation for water analysis. *Chemistry and Water*. 329–351.
- Tan, G., y Xiao, D. (2009). Adsorption of cadmium ion from aqueous solution by ground wheat stems. *Journal of Hazardous Materials*, 164:1359–1363.
- Stashenko, E. E. y Martínez, J. R. (2010). Algunos aspectos prácticos para la identificación de analitos por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas. *Scientia Chromatographica*, 2(1): 29-47.
- Taseidifar, M., Makavipour, F., Pashley, R. M. y Mohklesur, R. A. F. M. (2017). Removal of heavy metal ions from water using ion flotation. *Environmental Technology & Innovation*.
- Téllez, J., Roxs, M. C., y Gaitán, A. M. (2004). Aspectos toxicológicos relacionados con la utilización del cromo en el proceso productivo de curtiembres. *Revista de la Facultad de Medicina*, 52(1): 50-61.
- Tovar, C. T., Villabona, V. A. y Ruiz, P. E. (2015). Cinética de adsorción de Cr (VI) usando biomásas residuales modificadas químicamente en sistemas por lotes y continuo. *Revista Ion*, 28(1): 29-41.

- Tejada-Tovar, C., Villabona-ortiz, Á. y Garcés-Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecno Lógicas*, 18(34): 109–123.
- Tejada, C. N., Montiel, Z. y Acevedo, D. (2016). Aprovechamiento de cáscaras de yuca y ñame para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con Pb (II). *Información Tecnológica*, 27(1): 9–20.
- Tejada, C. T., Villabona, Á. O. y Jiménez, M. V. (2017). Remoción de cromo hexavalente sobre residuos de cacao pretratados químicamente. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 20(1): 139–147
- The Plan Anacostia, W. R. (2009). The Anacostia Watershed Restoration Partnership. *Anacostia Watershed Restoration Partnership*, 2.
- Trujillo, E., Fonseca, G., García, M. A., y Martínez, V. (2009). Evaluación de la cromatografía iónica para fomentar su uso en la investigación y estudios de posgrado en ciencias del agua. *Formación Universitaria*, 2(1): 7–16.
- Urrutia, R., Yevenes, M. y Barra, R. (2002). Determinación de los niveles basales de metales traza en sedimentos de tres lagos andinos de Chile: Lagos chungará, Laja y Castor. *Boletín de la Sociedad Chilena de Química*, 47(4): 457-467.
- Valentinuzzi, M. C. (2008). Analisis por fluorescencia de rayos X: implementacion de guias de haces en reflexion total. *Tesis de Doctorado en Física*. Universidad nacional de Cordoba, Argentina: 1-103.
- Vargas Nieto, C., Garriazo, J. G. y Castillo, E. (2011). Estudio de materiales adsorbentes de bajo costo para remover Cr (VI) de efluentes acuosos. *Ingeniería E Investigación*, 31(1): 154–162.
- Vázquez-Alárcon, A., Justín-Cajuste, L., Siebe-Grabach, C., Alcántar-González, G. y de la Isala de Bauer, M. de L. (2001). Cadmio, níquel y plomo en agua residual, suelo y cultivos en el valle del Mezquitil, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 35(3): 267–274.
- Vázquez-Sauceda, M. D. L., Aguirre-Guzmán, G., Pérez-Castañeda, R., Rábago-Castro, J. y Sánchez, J. . G. (2005). Contenido de cadmio y plomo en agua , ostión y sedimento de la laguna de San Andrés , Aldama , *Ciencia y Mar*, 9(27): 3–9.
- Valdiviezo A, C., y Castillo J, I. (2011). El Bambú en México. *Usjt Arquitectura Urbana*, (6): 143–154
- Vega, C. M. A. (2018). Uso de residuos agroindustriales de vainas de vainilla (*Vainilla planifolia*, Jackson, ex Andrews) como biosorbente de cromo hexavalente. *Tesis de Maestría en Ciencias*, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México: 1-92.
- Vilarrasa, G. E. (2014). Desarrollo de materiales para adsorción. *Tesis de Doctorado en Ciencias*. Universidad de Málaga, España: 1-327.
- Villalba, A. I. A., del Castillo, J. M. A., Gómez, A. Á., Pérez, A. M. V., Nubes, G. O., Villaba, S. U. y Salcido, A. E. (2012). Contaminación del agua y suelo en ecosistema río. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, 9(1): 3-4.
- Villalobos, M., Ramírez, L. M., Aguilar, N. P., Rubio, H. A., Pinedo, C. Á., y Sánchez, C. V. V. (2014). Remoción de plomo en solución acuosa por la cáscara de naranja. *Investigación y Ciencia*, 22(62): 5–10.
- Villanueva, C. A. (2017). Estudio de la remoción de cromo hexavalente presente en solución acuosa,

empleando la biomasa de la *Musa paradisiaca* como bioadsorbente. *Tesis de Licenciatura en Ciencias*. Universidad Autónoma del Estado de México: 1-117.

Villatoro, M. del R. del V. (2006). Evaluación de un método por espectroscopía UV-Vis para la detección de contaminantes. *Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química*. Universidad de San Carlos de Guatemala: 1-101.

Visarrea, T. S. P. (2018). Estudio comparativo del grado de transpirabilidad de la humedad en fibras de bambú y algodón. *Tesis de Licenciatura en Ciencias*. Universidad Técnica del Norte, Ecuador: 1-133.

Vullo, D. L. (2003). Microorganismos y metales pesados: una interacción en beneficio del medio ambiente. *Química Viva*, 2(3): 93–104.

Zabihi, M., Haghghi Asl, A. y Ahmadpour, A. (2010). Studies on adsorption of mercury from aqueous solution on activated carbons prepared from walnut shell. *Journal of Hazardous Materials*, 174:251–256.

Zerquera, A. H. M., Pérez, R. G., Días, A. I., Delgado, S. A y de Armas, L. R. (2000). Resinas de intercambio iónico para prolongar la liberación de los fármacos. *Revista Cubana de Farmacia*, 34(3): 196-206.