

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE QUIMICA Y FARMACIA**



**EVALUACION DE LA CAPACIDAD DE ADSORCION DE CROMO (VI) CON
CLADODIOS DE *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose MEDIANTE LAS
ISOTERMAS DE LANGMUIR Y FREUNDLICH**

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO POR

MERLYN ESTEYSI CASTILLO ESCOBAR
KATHERINE MICHELLE SORTO LARIN

PARA OPTAR AL GRADO DE

LICENCIADA EN QUIMICA Y FARMACIA

MARZO DE 2023

SAN SALVADOR, EL SALVADOR, CENTRO AMERICA.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR

MAESTRO ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL

FACULTAD DE QUIMICA Y FARMACIA

DECANA

LICDA. REINA MARIBEL GALDAMEZ

SECRETARIA

LICDA. EUGENIA SORTO LEMUS

DIRECCION DE PROCESOS DE GRADO

DIRECTORA GENERAL

MSc. Ena Edith Herrera Salazar

TRIBUNAL EVALUADOR

**ASESORES DE AREA EN APROVECHAMIENTO DE RECURSOS
NATURALES**

Licda. Ana Miriam Santamaria de Campos

Dr. David Francisco Torres Romero

DOCENTES ASESORES

Licdo. Marco Antonio Aquino Campos

AGRADECIMIENTOS

- Primeramente, agradecemos a Dios todopoderoso y a la Virgen María por habernos permitido alcanzar esta gran meta, brindándonos la sabiduría, el valor y la fortaleza a lo largo de nuestra carrera.
- A nuestros docentes asesores: Licdo. Marco Antonio Aquino Campos e Ing. Sergio Armando Maravilla Miranda; por todo el apoyo, amistad, consejos y sobre todo la inigualable dedicación en el transcurso del desarrollo de este trabajo.
- A nuestros asesores de área: Licda. Ana Miriam Santamaría de Campos y Dr. David Francisco Torres Romero; por su disposición y contribución con el enriquecimiento de este trabajo de graduación.
- A Adalberto Rogelio Moran Ortiz, por su valioso apoyo incondicional y desinteresado durante el desarrollo de la parte práctica de la investigación, además a todas las personas que de forma directa o indirecta colaboraron con el trabajo.
- A todas las personas que estuvieron a nuestro alrededor brindándonos su apoyo y amistad para lograr esta meta.

DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen: Por haberme dado la vida, protegerme, darme fuerzas y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mis Padres: Milton Castillo y Marely de Castillo, por ser el pilar fundamental y más importante, ejemplo a seguir y mis ganas de continuar creciendo como persona. Porque son todo lo que amo, y mi vida sin ustedes no tendría el sentido que ahora tiene. Se merecen todos mis triunfos y les dedico éste que gracias a ustedes hoy he logrado.

A mis tíos: Santo y Vilma, quienes son una gran bendición que Dios puso en mi camino, por su absoluta ayuda, consejos y paciencia, que el Señor siempre los bendiga y nunca falten en mi vida.

A mi Hermano: Rubén Castillo, por tus consejos, comprensión y total apoyo, porque me regalaste dos joyas preciadas que son mis sobrinos Abraham y Celeste, que me dieron vida y fortaleza.

A mi abuelita Lilian: Soy la persona más afortunada por tenerte como abuela, por tus oraciones infinitas, tu amor y por creer en mí incondicionalmente, por tu total ayuda siempre en todas las etapas de mi vida, te amo.

Al amor de mi vida: A mi Rodri porque a pesar de las adversidades siempre estuviste presente, por todo el amor, la paciencia, y esa manera de hacerme ver la vida diferente, por formar parte de mi existencia y porque me llenas de felicidad.

A mi compañera de tesis: Katherine Sorto, por su ayuda y porque más que mi compañera, es una gran amiga; sin ella esto no podría haber sido posible.

A mi demás familia y amigos. Porque siempre han confiado en mí, por su amistad, por todo ese cariño que me brindan, sin ustedes tampoco tendría sentido este gran logro.

Merlyn Esteysi Castillo Escobar

DEDICATORIA

A Dios y la Virgen María, por permitirme cumplir una meta más en vida, porque cada día me han dado la paciencia y sabiduría para culminar mis estudios, y que gracias a su bendición he llegado hasta este punto en mi vida con esfuerzo.

A mi papá Herberth Sorto, aunque no ha sido fácil, sus enseñanzas han sido luz para mi vida, y siempre me apoyó durante todo este camino.

A mi mamá Michelle Larín, porque me ha enseñado a ser fuerte y luchar por mis sueños, a nunca rendirme. Porque gracias a su cariño, esfuerzo, apoyo y consejos, he logrado alcanzar esta meta.

A mis hermanos, porque siempre creyeron en mí y me apoyaron en todas mis decisiones.

A mi familia, quienes han creído en mí siempre, dando ejemplo de superación, humildad y sacrificio, enseñándome a valorar todo lo que tengo.

A Oscar, mi persona especial, amor de mi vida, le doy todas las gracias, por su generosidad, por cambiarme la vida, porque se ha convertido en mi motor y felicidad, gracias por toda su ayuda que ha sido primordial para mí, y con ello logrado cumplir esta meta, por su apoyo incondicional todo esto ha sido posible.

A mi compañera de tesis y amiga, Esteysi Castillo que después de los años de amistad pudimos apoyarnos y compartir momentos especiales en nuestras vidas logrando este objetivo juntas.

A mis amigos, los que estuvieron ahí desde el primer día de clases y se quedaron hasta el final, porque gracias a la ayuda de todos, esto es posible.

Katherine Michelle Sorto Larín

INDICE GENERAL

	N° Pág.
RESUMEN	
CAPITULO I	
1.0 INTRODUCCION	XV
CAPITULO II	
2.0 OBJETIVOS	
2.1 Objetivo general	
2.2 Objetivos específicos	
CAPITULO III	
3.0 MARCO TEORICO	20
3.1 Género Opuntia	20
3.1.1 Generalidades de la Opuntia	20
3.1.2 <i>Opuntia guatemalensis</i> Britton & Rose	23
3.2 Metales Pesados	25
3.2.1 Generalidades del cromo	25
3.2.2 El cromo en la industria	26
3.2.3 El cromo en el agua	27
3.2.4 Efectos del cromo sobre la salud humana	27
3.2.5 Efectos del cromo sobre plantas y animales	28
3.2.6 Límites permisibles de cromo	29
3.2.7 Tratamientos de remoción de cromo (VI)	29
3.2.8 Métodos para el análisis cuantitativo de cromo	37
3.3 Isotermas de adsorción	38
3.3.1 Isotermas de Langmuir	39
3.3.2 Isoterma de Freundlich	40
3.4 pH en el Punto de Carga Cero (pHPCC)	41

CAPITULO IV	
4.0 DISEÑO METODOLOGICO	44
4.1 Tipo de estudio	44
4.2 Investigación bibliográfica	44
4.3 Universo y muestra	44
4.4 Parte experimental	47
4.6 Plan de análisis	53
CAPITULO V	
5.0 RESULTADOS Y DISCUSION DE RESULTADOS	55
CAPITULO VI	
6.0 CONCLUSIONES	68
CAPITULO VII	
7.0 RECOMENDACIONES	70
BIBLIOGRAFIA	
ANEXOS	

INDICE DE FIGURAS

Nº Figura		Nº Pág.
1	Flor y cladodios <i>Opuntia guatemalensis</i> Britton & Rose	23
2	Distribución de <i>Opuntia guatemalensis</i> Britton & Rose en El Salvador	24
3	Ejemplo de estimación del tiempo de equilibrio del bioadsorbente	35
4	Ejemplo del establecimiento de la dosis de bioadsorbente	36
5	Espectro FT-IR, <i>Opuntia guatemalensis</i> Britton & Rose	55
6	Gráfica de ΔpH versus pH para definir el pH _{PCC} de los cladodios de <i>Opuntia guatemalensis</i> Britton & Rose	57
7	Curva de calibración de cromo (VI)	59
8	Gráfica de %R versus gramos de biomasa agregados para establecer la influencia de la concentración en la remoción de Cr(VI)	60
9	Gráfica de %R versus tiempo de contacto para estimar el tiempo de equilibrio para alcanzar la máxima remoción de Cr (VI)	62
10	Gráfica de isoterma de adsorción de Langmuir	64
11	Gráfica de isoterma de adsorción de Freundlich	64
12	Gráfica de Isoterma de Adsorción Tipo I	66

INDICE DE TABLAS

N° Tabla		N° Pág.
1	Tabla composición química de cladodios de <i>Opuntia</i> con respecto a la edad de la panta	21
2	Límites permisibles de cromo en diferentes matrices basados en la Organización Panamericana de la Salud (OPS)	29
3	Límites de Cr (VI) en aguas según norma salvadoreña	29
4	pH inicial, pH final y Δ pH para calcular el pHPCC	57
5	Promedio de concentración de Cr y absorbancia promedio para la curva de calibración	58
6	Constantes de las Isoterma de Langmuir y Freundlich para la adsorción de cromo (VI) con cladodios secos de <i>Opuntia guatemalensis</i> Britton & Rose	65
7	Constantes de las Isotermas de Langmuir y Freundlich para diferentes biomasas y contaminantes	66

INDICE DE ANEXOS

Nº Anexo

- 1 Constancia de identificación de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose
- 2 Fotografías de procedimientos realizados en el laboratorio
- 3 Esquema de trabajo para definir el pH en el Punto de Carga Cero (pHPCC) de los cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose
- 4 Esquema de trabajo para elaborar la curva de calibración para la cuantificación de Cr (VI)
- 5 Esquema de trabajo para establecer la influencia de la concentración de la biomasa de cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose en la remoción de Cr (VI)
- 6 Esquema de trabajo para estimar el tiempo de equilibrio para alcanzar la máxima remoción de Cr (VI) usando los cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose
- 7 Resumen de resultados de pH para el cálculo del pHPCC
- 8 Absorbancias del estándar para la elaboración de la curva de calibración de Cr (VI)
- 9 Resultados de la influencia de la concentración de biomasa en la remoción de Cr (VI)
- 10 Resultados del tiempo de equilibrio para alcanzar la máxima remoción de Cr (VI) para un tiempo de contacto de cero minutos
- 11 Resultados del tiempo de equilibrio para alcanzar la máxima remoción de Cr (VI) para un tiempo de contacto de 5 minutos
- 12 Resultados del tiempo de equilibrio para alcanzar la máxima remoción de Cr (VI) para un tiempo de contacto de 10 minutos

- 13 Resultados del tiempo de equilibrio para alcanzar la máxima remoción de Cr (VI) para un tiempo de contacto de 15 minutos
- 14 Resultados del tiempo de equilibrio para alcanzar la máxima remoción de Cr (VI) para un tiempo de contacto de 30 minutos
- 15 Resultados del tiempo de equilibrio para alcanzar la máxima remoción de Cr (VI) para un tiempo de contacto de 60 minutos
- 16 Resultados para el cálculo de las constantes de Langmuir y Freundlich

RESUMEN

La remoción de metales pesados con bioadsorbentes es una alternativa económica y eficaz para solventar el problema de contaminación de las aguas. Es por ello que la presente investigación ha centrado su atención en la necesidad de evaluar la capacidad de adsorción de cromo (VI) de la biomasa de cladodios secos de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose, especie que se encuentra en El Salvador. La investigación parte de cladodios secos y molidos con tamaño de partícula aproximado de 0.151mm, con los cuales se identificaron los grupos funcionales mediante espectroscopia infrarroja. Así mismo, con soluciones de pH entre 2 y 12 se definió el pH en el punto de carga cero. Además, se midió la concentración de cromo (VI) por espectrofotometría visible a 540 nm, antes y después de agregar dosis entre 0.01 y 1.5 g de biomasa por 100mL de solución. También se probaron tiempos de agitación entre 5 y 60 minutos para estimar el punto donde se alcanza la máxima remoción de cromo (VI), con el cual se determinaron las constantes de las Isotermas de Langmuir y Freundlich. En el espectro infrarrojo, hubo bandas características a 1033.67 cm^{-1} pertenecientes a polisacáridos. Por otra parte, con un pH arriba de 6.3 se lleva a cabo una mejor remoción de cromo (VI). Al mismo tiempo, se obtuvieron porcentajes de remoción de cromo (VI) entre 10.5 a 93.8% con las dosis de biomasa probadas, teniendo que con 1.0 g/100mL se logran resultados óptimos. De igual forma, aunque con 5 minutos de agitación se remueve más de la mitad de cromo (VI), con 30 minutos de contacto se remueve un 82.4%. Por último, con un R^2 de 0.9256 y $1/n$ igual a 0.661, la biomasa se ajusta a la Isoterma de Freundlich. Por lo tanto, los cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose presentan una adsorción favorable del cromo (VI) en monocapa del tipo I por medio de quimisorción, y se recomienda estudiar la remoción con otros metales pesados.

CAPITULO I

1.0 INTRODUCCIÓN

En El Salvador, una gran cantidad de cuerpos de agua superficiales presentan contaminación por metales pesados, los cuales son generados por los residuos de las empresas y pueden ser perjudiciales para la salud de los seres vivos. Si bien existen diversas tecnologías para eliminar estos contaminantes, como la precipitación, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa, entre otras, su implementación resulta muy costosa. Por ejemplo, especies del género *Opuntia*, han sido capaces de adsorber naturalmente contaminantes como el azul de metileno, plomo, cadmio, cromo (VI), etc.

En la presente investigación se utilizaron cladodios secos de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose con tamaño de partícula de 0.151 mm (biomasa) para verificar la capacidad de adsorción de cromo (VI). Para ello, según bibliografía, primeramente, se analizaron los cladodios secos mediante FT-IR, identificando los grupos funcionales presentes en éstos como los carboxilos y característicos de los polisacáridos. Luego se determinó el pH donde la carga superficial neta en el biosorbente es cero (pHPCC), midiendo el cambio que ejerce la biomasa en soluciones a pH de 2, 4, 6, 8, 10 y 12, obteniendo que a pH superiores a 6.3 se logra una mayor remoción. Para calcular la concentración de cromo (VI) en todo el experimento, se elaboró una curva de calibración mediante espectroscopia ultravioleta-visible con estándares de cromo (VI) a concentraciones de 0.10, 0.25, 0.50, 0.75 y 1.00 mg/L partiendo de $K_2Cr_2O_7$; utilizando la 1,5-difenilcarbazida para desarrollar el color y leyendo a 540 nm, obteniendo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9999.

Posteriormente se estableció la dosis de biomasa a la cual se logra una mejor bioadsorción con la menor cantidad posible, para ello se probaron diferentes cantidades de biomasa (0.01, 0.10, 0.25, 0.50, 1.0 y 1.5 g) sobre una

solución de cromo (VI) al 0.50 mg/L, encontrando que a una concentración de 10 mg/mL se logra la mejor bioadsorción. Con esta dosis se estimó el tiempo de contacto óptimo para lograr una mejor adsorción (tiempo de equilibrio), donde a cada una de las concentraciones de cromo (VI) utilizadas en la curva de calibración junto con la dosis de biomasa necesaria, se agitaron durante 5, 10, 15, 30 y 60 minutos; pero a un tiempo de 30 min se logró una mejor bioadsorción. Por último, a partir de la pendiente e intercepto de los gráficos lineales de las Isotermas de Langmuir y Freundlich, se calcularon las constantes para determinar la capacidad de adsorción de los cladodios secos de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose, siendo el modelo de Freundlich el que mejor se ajustan, con un valor de R^2 de 0.9256 y $1/n$ de 0.661.

La parte experimental se desarrolló de junio a agosto de 2022 en el Laboratorio de Química Analítica Ocupacional y Ambiental, de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador.

CAPITULO II

2.0 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar la capacidad de adsorción de cromo (VI) con cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose mediante las Isotermas Langmuir y Freundlich.

2.2 Objetivos específicos

- 2.2.1 Identificar los principales grupos funcionales de la biomasa de cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose por FT-IR.
- 2.2.2 Definir el pH en el Punto de Carga Cero (pHPCC) de la biomasa de cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose.
- 2.2.3 Establecer la influencia de la concentración de la biomasa de cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose en la remoción de cromo (VI).
- 2.2.4 Estimar el tiempo de equilibrio para alcanzar la máxima remoción de cromo (VI) usando los cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose.
- 2.2.5 Determinar las constantes de adsorción de los cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose mediante las isotermas de adsorción de Langmuir y Freundlich

CAPITULO III

3.0 MARCO TEORICO

3.1 Género Opuntia

3.1.1 Generalidades de la Opuntia

La Opuntia es el género de la familia Cactaceae, muy conocido a nivel mundial, con cerca de 190 especies nativas del continente americano, y distribuidas desde el sur del Canadá hasta el sur de Argentina. Muchas de las especies son variables por efecto de la dispersión natural, factores ambientales, la hibridación y el cultivo. Forman parte de las comunidades vegetales de los bosques secos, siendo México un centro de diversificación de este género, se encuentran alrededor de 83 especies silvestres. (1)

Este género también conocido como nopales, se identifica por mostrar tallos fotosintéticos articulados en cladodios mayormente aplanados, cilíndricos o globosos, areolas con espinas, algunas espinas alargadas y finas llamadas cerdas; otras espinas defensivas conocidas como gloquidios o “ahuates”, propias de la subfamilia Opuntioideae, estos son muy delgados, pequeños, rígidos, y muy numerosos. Las flores son hermafroditas, solitarias, terminales o subterminales, diurnas, deciduas, con gloquidios en sus areolas, a veces con cerdas o espinas; tienen un tubo receptáculor corto; perianto en forma de roseta y tubular, pueden ser de colores rojos, anaranjados, rosados, amarillos o verdosos; las flores tienen múltiples estambres, ovario ínfero con varios óvulos; los frutos son en forma de baya, rojos al madurar, ocasionalmente con gloquidios y semillas ariladas.(2)

Todas las estructuras están adaptadas para la absorción y retención de agua, y tienen un importante potencial por usos múltiples: ecológico, alimenticio (frutícola y nopal-verdura), medicinal, histórico-cultural, económico, forrajero, para la recuperación de tierras y reforestación de zonas áridas y semiáridas. (3)

Se ha podido describir la potencialidad de las especies del género *Opuntia* de las cuales se destaca su utilización en la elaboración de numerosos productos tales como: mermeladas, harinas deshidratadas, conservas, jugos, confituras, bebidas alcohólicas y fuentes de pigmentos naturales como betalaínas que presentan efectos antioxidantes, anticancerígenos, antimicrobiano y contribuyen a combatir la arteriosclerosis. Adicionalmente, se ha descrito que el consumo de las raquetas o cladodios favorece la disminución del colesterol, triglicéridos y la hipoglucemia. (4)

La composición química de los cladodios de *Opuntia* varía de acuerdo con su edad, la ubicación del crecimiento, las condiciones climáticas prevalecientes y las condiciones del suelo, entre otros.

En la tabla N° 1, se muestra un ejemplo de la variación de contenido químico en los cladodios de *Opuntia* con respecto a la edad de la planta. (25)

Tabla N°1. Tabla composición química de cladodios de *Opuntia* con respecto a la edad de la planta. (25)

Edad (años)	Proteína (%)	Grasa (%)	Cenizas (%)	Fibra cruda (%)	Extracto no nitrogenado (%)
0.5	9.4	1.00	21.0	8.0	60.6
1	5.4	1.29	18.2	12.0	63.1
2	4.2	1.40	13.2	14.5	66.7
3	3.7	1.33	14.2	17.0	63.7
4	2.5	1.67	14.4	17.5	63.9

Así también los cladodios de opuntia contienen elevada cantidad de agua, compuestos hidrocarbonatos entre los que destacan galactosa, xilosa, arabinosa y la fibra dietética que está constituida por diferentes proporciones de lignina, hemicelulosa, pectina mucílago (fibra soluble), celulosa (fibra insoluble) y gomas, además de proteínas y pequeñas cantidades de calcio, hierro, ácido ascórbico, tiamina, riboflavina y niacina (25). Las plantas de cactus *Opuntia* contienen además de carotenoides como β -Caroteno y β -Cryptoxantina aminoácidos como

prolina, glutamina, taurina, serina, alanina, ácido glutámico, lisina ⁽²⁶⁾, también poseen componentes como polifenoles que brindan efectos antioxidantes, entre estos flavonoides y pigmentos como betalainas. Estos y otros grupos fitoquímicos tales como ácidos fenólicos, esteroides, ésteres, cumarinas, terpenoides, que producen varios beneficios para la salud, como la hipoglucemia y actividades antioxidantes. Por otra parte, también las cáscaras de *Opuntia* contienen ácidos grasos, carbohidratos, vitaminas y antioxidantes. De igual forma la viscosidad que poseen las pulpas se ve influida por la presencia de pectinas y mucílagos. Ambos compuestos están considerados fuente nutritiva y de salud, tanto de manera fresca como deshidratada, de ahí su interés como alimento, tal es el caso de la harina de nopal se obtiene por deshidratación y molienda de los cladodios.⁽⁵⁾

Entre los grupos funcionales comunes de los adsorbentes naturales se encuentran los grupos hidroxilo (-OH), carboxilo (-COOH), sulfhidrilo (-SH), entre otros; en donde un cambio del pH, cambia el estado de estos grupos, modificando la interacción con los contaminantes.

Algunos estudios mencionan otras especies de *Opuntia* donde por Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FT-IR) pueden obtenerse espectros que evidencian la presencia de grupos funcionales como grupos hidroxilo -OH, carbonilo C=O, éteres C-O-C en grupos y aminas aromáticas ⁽⁹⁾. El método de Espectroscopia Infrarrojo tiene el principio básico que las moléculas absorben energía de la luz en longitudes de ondas específicas, conocidas como sus frecuencias de resonancia (vibración). Un espectrofotómetro infrarrojo funciona con una pequeña muestra que es colocada en una celda infrarroja, donde es sometida a una fuente de luz infrarroja, la cual hace un barrido desde las longitudes de onda de 4000 cm^{-1} hasta 600 cm^{-1} . La intensidad de la luz transmitida a través de la muestra es medida en cada número de onda, lo que permite que la cantidad de luz absorbida por la muestra sea calculada por la

diferencia entre la intensidad de la luz antes y después de pasar por la celda de muestra. Esto se conoce como el espectro infrarrojo de la muestra. ⁽¹⁰⁾

3.1.2 *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose

El nombre científico es *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose, también conocida como Nopal, tuna o cactus. Pertenece a la familia Cactaceae. Esta especie se puede describir como un arbusto, de 0.4 a 1.0 m de altura; con ramificación basal, más o menos difusa a ascendente; cladodios terminales 11-17 x 7-8 cm, más o menos obovados, glabros, verde oscuros, a veces con manchas purpúreo oscuras rodeando las aréolas, sin podarios; aréolas 1-2 mm, distantes entre sí 1.5-2.3 cm; glóquidas 1-5 mm, amarillo claras, abundantes; espinas (0-)1-2(-4) o ausentes parcialmente en los cladodios, (0-)1-3(-7) cm, aciculares, redondeadas, deflexas a rectas, blanco-amarillentas con el ápice negro cuando jóvenes, blanco-grisáceas al madurar. Flor 4.5-5.5 cm, de color amarillo, diurna; pericarpelo y tubo receptacular 2-2.6 x 1.5 cm, obcónico; tépalos externos 1.2-2 x 0.8-1.3 cm, deltoides a obovados, el ápice mucronado, rotados, amarillo claro con tono verde claro; tépalos internos 2-2.5 x 1-1.3 cm, obovados, amarillo claro. Fruto 2.4-4 x 2-2.6 cm, obovoide, rojo a rojo-purpúreo, las glóquidas 1-3 mm, espinas generalmente ausentes, la pulpa roja. Semillas, pardas cubiertas con tricomas (Ver figura N°1). ⁽⁶⁾



Figura N° 1. Flor y cladodios *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose (creación propia)

En El Salvador esta especie es utilizada como medicinal y los frutos son comestibles. Preferentemente crece en Bosque Seco Tropical, Bosque Húmedo Subtropical y con transición a Sub-húmedo y a Seco, caracterizada por crecer naturalmente en zonas bajas y medianas. En El Salvador se reporta creciendo desde 0 hasta 800 m de altitud. La floración se ha observado entre los meses de enero a mayo, y la fructificación entre los meses de mayo y agosto.

Es nativa de Guatemala a Costa Rica. En El Salvador se encuentra ampliamente distribuida en varios departamentos del país. Ejemplares representativos: Departamento: Ahuachapán: J. Menjívar et al. 2853 (MHES); Cabañas: J. Menjívar et al. 132 (MHES); Chalatenango: G. Cerén et al. 2634, 2869, 2873, 2879 (MHES); La Libertad: D. Rodríguez 2509 (LAGU), W. Berendson 377 (LAGU); La Unión: J.F. Morales et al. 15550 (MHES), G. Cerén et al. 3024 (MEXU, MHES), G. Davidse et al. 37352 (LAGU); Morazán: P. Galán 492 (MHES); San Miguel: G. Cerén et al. 2556, 2557 (MHES); Santa Ana: D. Rodríguez 1585 (LAGU, MO), 2100 (LAGU), G. Cerén et al. 2514 (MHES), J. Linares 7475 (EAP, MEXU), J. Linares y C. Martínez 7244 (EAP, MEXU), J. Monterrosa 86, 104 (LAGU), (Ver figura N°2).

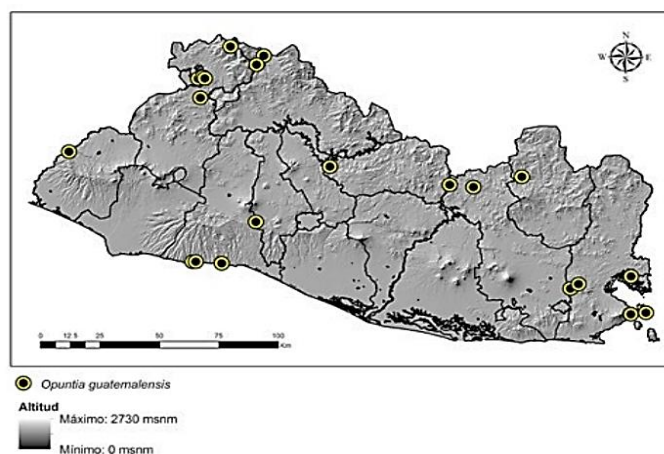


Figura N° 2. Distribución de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose en El Salvador⁽⁶⁾

3.2 Metales Pesados

Los metales pesados son elementos químicos que tienen una densidad mayor a 7 g/cm^3 , son de baja degradación, influyen en el desarrollo de los organismos afectando su crecimiento, además se acumulan en el ambiente, son altamente reactivos y tóxicos incluso a bajas concentraciones.⁽⁸⁾ Estos son: plomo (Pb), cromo hexavalente (Cr^{+6}), mercurio (Hg), cadmio (Cd), talio (Tl) y arsénico (As), dichos elementos no se degradan fácilmente y pueden persistir en el entorno por muchos años causando contaminación si no se realiza un tratamiento adecuado.

A través de los años, estudios han confirmado que la mayoría de las intoxicaciones por metales pesados son por medio de ingestión o inhalación, lo cual surge de la exposición a nivel de las industrias que hacen uso de ellos. De igual manera otra de las causas por la que estos elementos se incorporan a los animales y seres humanos es por medio de la liberación de iones metálicos en disolución a los medios acuáticos, representando riesgo a la humanidad debido a la capacidad de bioacumulación que estos presentan a medida avanza la cadena trófica. ⁽⁸⁾

3.2.1 Generalidades del cromo

El cromo pertenece al grupo de los metales de transición. En su estado puro, es sólido, frágil, de color gris plateado brillante. Es muy resistente frente a la corrosión, es un elemento común y ocupa el puesto 21 en abundancia entre los elementos de la corteza terrestre. ⁽⁸⁾ El cromo puede funcionar con distintas valencias y en el ambiente se encuentra en varias formas; las más comunes son las derivadas del cromo trivalente o cromo (III) o el cromo hexavalente o cromo (VI), siendo este último altamente tóxico. ⁽¹¹⁾

El cromo hexavalente es más tóxico que el trivalente ya que este último se encuentra en la cromita, pero al entrar en contacto con el oxígeno del aire se

oxida y se convierte en cromo (VI). Finalmente forma compuestos ácidos y sales de cromo.⁽¹¹⁾ La intoxicación por cromo (VI) se da por medio de tres vías: oral, respiratoria y dérmica, especialmente en ambientes de trabajo donde se usa este compuesto, generando erupciones cutáneas, dermatitis, cáncer, daño en pulmones y ojos.⁽⁸⁾ La abundancia de este metal en la tierra y en el universo es muy variable, en el universo se encuentra aproximadamente 15 ppm por masa, en el sol 20 ppm y en meteoritos de carbono 3.2 ppm.⁽¹¹⁾

Las fuentes más importantes de contaminación de cromo son aquellas relacionadas con el ambiente ocupacional. Las principales actividades que involucran la contaminación de cromo son la minería y la industria. Se puede encontrar cromo en el aire, el suelo y el agua después de ser liberado por industrias que usan este elemento.

3.2.2 El cromo en la industria

Por sus características químicas y por los beneficios que brinda en la elaboración de múltiples productos, los compuestos del cromo son utilizados en diversos procesos industriales⁽¹¹⁾. En la industria, se utiliza principalmente en el revestimiento de metales (cromados) con fines estéticos, decoración y cambios de color de distintos materiales. Además, este elemento es un importante agente en los procesos de curtido de pieles y tratamiento de maderas.⁽¹²⁾ . Por lo tanto, la principal actividad industrial responsable de la emisión de partículas con cromo (VI) a la atmósfera es la producción de cromatos, que además genera residuos sólidos que al no ser tratados adecuadamente se convierten en contaminantes potenciales del suelo y del agua.⁽¹¹⁾

Por ejemplo, la dificultad que presenta el uso de sales de cromo en el curtido de pieles es la cantidad de curtiente que no se fija, y que permanece en los reflujos y los lodos de depuración, lo cual impide la utilización de los materiales

residuales, principalmente de este metal. La magnitud de este residual dependerá de la eficiencia del proceso particular del curtido y es determinada por algunas variables: la oferta del metal, el tiempo de operación, la temperatura y el pH del baño de curtido. (13)

3.2.3 El cromo en el agua

El cromo es el segundo metal, después del plomo, más común presente en los mantos acuíferos contaminados, donde las fuentes potenciales de contaminación son los residuos sólidos y los efluentes líquidos. (12) Muchas aplicaciones industriales que usan el cromo (VI), lo depositan sobre el suelo como desechos en estado sólido, que al descomponerse e infiltrarse el agua de lluvia a través de ellos, producen lixiviados. Éstos migran en fase acuosa interactuando a su paso con las partículas del suelo. Una vez que estas partículas llegan al nivel freático producen la contaminación de las aguas subterráneas creando plumas de contaminación y superando así las normas de calidad del agua potable. (12)

La mayoría de los compuestos de cromo en especial los del hexavalente son altamente solubles en agua. Dependiendo del pH este metal puede estar presente en los cuerpos de agua y en las aguas residuales domesticas e industriales como H_2CrO_4^- , HCrO_4^- , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, CrO_4^{2-} . (11)

3.2.4 Efectos del cromo sobre la salud humana

El Cromo (III) es un nutriente esencial para los humanos y la falta de este puede causar condiciones del corazón, trastornos metabólicos y diabetes, pero su ingesta excesiva puede causar efectos sobre la salud también, por ejemplo, erupciones cutáneas.(8) La mayor fuente de ingesta de cromo (III) para las personas es la comida, ya que se encuentra naturalmente en muchos vegetales, frutas, carnes, levaduras y granos.(12) La preparación al almacenaje de la comida puede alterar el contenido de cromo en los alimentos, sobre todo cuando son almacenados en tanques de acero o latas.

Sin embargo, normalmente los efectos nocivos del cromo se deben a la forma hexavalente del metal, la cual es 100 veces más tóxica y 1000 veces más mutagénica que la forma trivalente. La inhalación por periodos largos de tiempo puede causar irritación del tracto respiratorio, obstrucción de las vías respiratorias, ulceración de la mucosa nasal, hemorragias nasales y cáncer de pulmón. Al contacto con la piel puede provocar desde una leve irritación a úlceras muy dolorosas. Los riñones y el tracto intestinal son las dos vías por las cuales se excreta la mayor cantidad de cromo ingerido. La fracción no absorbida de cromo (VI) se elimina en forma trivalente.

3.2.5 Efectos del cromo sobre plantas y animales

El cromo entra al aire, agua y suelo en forma de cromo (III) y cromo (VI) a través de los procesos naturales y las actividades humanas. Los cultivos contienen sistemas para administrar el cromo para hacer de este lo suficientemente bajo como para causar cualquier tipo de cáncer. Sin embargo, cuando la cantidad de cromo en el suelo aumenta, esto puede aumentar las concentraciones en los cultivos. La acidificación del suelo también puede influir en la absorción de cromo por los cultivos. Las plantas generalmente sólo absorben cromo (III). Esta clase probablemente de cromo es esencial, cuando su verdadero valor excede las concentraciones, pueden producirse efectos crucialmente negativos.

El cromo hexavalente posee derivados como los cromatos y dicromatos, que casi siempre son producidos por el hombre, estos al estar en altas concentraciones producen toxicidad en las plantas, ocasionándoles una disminución en la captación de calcio, fósforo, hierro, potasio, manganeso; además de cambios en el metabolismo de carbohidratos y disminución en la producción de clorofila. (7)

3.2.6 Límites permisibles de cromo

El límite en el que un elemento empieza a dañar a un organismo no es fijo, depende de las características de cada individuo y de las de la especie. En la tabla N° 2 se muestran los datos basados en la Organización Panamericana de la Salud (OPS).

Tabla N° 2. Límites permisibles de cromo en diferentes matrices basados en la Organización Panamericana de la Salud (OPS). (creación propia)

Matriz	Límite permisible de cromo
Aire	0.001 – 0.002 µg/m ³
Suelos	Hasta 250 mg/kg
Alimentos	20 – 60 µg/Kg
Verduras	20 – 50 µg/Kg
Frutas	20 µg/Kg
Cereales	40 µg/Kg
Mariscos	20 – 200 µg/Kg
Agua	0.005 mg/L
Tabaco	390 µg/Kg

Por otra parte, existe normativa en El Salvador sobre los límites permisibles de cromo (VI) en diferentes tipos de aguas. En la tabla N° 3 se detallan cada uno y la normativa de referencia correspondiente.

Tabla N° 3. Límites de Cr (VI) en aguas según norma salvadoreña (creación propia)

Norma o reglamento	Tipo de agua	Valor permisible de Cr (VI)
NSO 13.07.01:08	Agua potable	0.05 mg/L
NSO 13.07.02:08	Agua envasada	0.05 mg/L
RTS 13.02.01:14	Agua de consumo humano	0.05 mg/L
NSO 13.49.01:09	Aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor	0.1 mg/L
RTS 13.05.01:18	Aguas residuales para descarga y manejo de lodos residuales	0.5 mg/L
Acta N° 1937 punto XIV (plan hidro 2009)	Aguas residuales de tipo especial descargadas al alcantarillado sanitario	0.5 mg/L

3.2.7 Tratamientos de remoción de cromo (VI)

A medida ha pasado el tiempo y avanzan las investigaciones, se ha visto la

necesidad de crear y poner a prueba diferentes métodos de eliminación para todos aquellos contaminantes que tengan un impacto nocivo al medio ambiente, como por ejemplo los metales pesados.

De ellos el cromo es un elemento de gran interés debido al impacto en la salud pública, por lo cual se dice que se han implementado alternativas para solventar este problema. Para el tratamiento de aguas contaminadas con cromo y otros metales pesados, existen técnicas convencionales y no convencionales, las cuales se detallan a continuación:

- **Técnicas convencionales:**

Osmosis inversa: es un fenómeno de separación o más bien un proceso que se basa en la difusión a través de una membrana semipermeable que facilita el paso de las sustancias que se encuentran en el agua en un lado de la membrana y del otro lado se obtiene una solución diluida baja en sólidos disueltos mediante una fuerza de empuje superior a la presión osmótica. Esta técnica presenta inconvenientes, tales como la escasa experiencia en su aplicación para eliminar metales pesados y su elevado coste. (7)

Electrodialisis: la electrodialisis es el proceso que utiliza membranas intercambiadoras que permiten separar sustancias iónicas en disolución al aplicar una diferencia de potencial, y es utilizada en muchos países como alternativa para separar, concentrar y purificar sustancias. Su mayor aplicación es la obtención de agua potable a partir de aguas salobres. Se ha desarrollado últimamente en otros campos que cada vez presenta mayor interés en su uso, tales como, el tratamiento de efluentes industriales o la producción de agua de alimentación para calderas, en la industria de los galvanizados, industria de la alimentación, industria farmacéutica, etc. (8)

Precipitación Química: es la técnica más ampliamente utilizada para la recuperación metálica. El proceso consiste en adicionar un reactivo iónico para que se combine con un catión metálico presente en una disolución, formando un compuesto insoluble que es retirado. Presenta algunas desventajas. La primera de ellas es que se produce un incremento neto del contenido de sólidos disueltos en el agua. Además, se produce un gran volumen de fango, que debido a que el alto contenido en compuestos tóxicos hace dificultoso su tratamiento y evacuación. Todo esto conlleva a que el tratamiento del agua se convierta en un proceso caro. (7)

Otros: existen otras técnicas para la remoción de metales pesados como nanofiltración, ultrafiltración, adsorción convencional (carbón activado y nanotubos de carbón), electrocoagulación, coagulación-floculación, electro floculación, flotación, etc. (14)

- **Técnicas no convencionales:**

Biopolímeros: son industrialmente atractivos porque son capaces de reducir las concentraciones de iones metálicos de transición a concentraciones de partes por billón, son ampliamente disponibles y ambientalmente seguros. Poseen un número amplio de diferentes grupos funcionales, tales como hidroxilos y aminas, que aumentan la eficiencia de la absorción de iones metálicos. (14)

Hidrogeles: son polímeros hidrófilos reticulados capaces de ampliar sus volúmenes debido a su alta expansión en el agua. Por consiguiente, ellos son ampliamente utilizados en la purificación de las aguas residuales. (14)

Bioadsorción: el principal método de eliminación de cromo, debido a sus altas ventajas es la bioadsorción, donde la materia viva posee una gran capacidad para adsorber y absorber metales pesados, tanto si son preciosos, como tóxicos.

La técnica de bioadsorción utiliza un potencial para extraer metales de medios altamente contaminados bien sea mediante biomasa viva (que es autorrenovable) o muerta (que es más ventajoso desde un punto de vista económico). La bioadsorción posee gran capacidad de concentración, no es un proceso metabólico sino pasivo, permitiendo la captación activa o pasiva de iones metálicos en la superficie de la célula. (15)

Este proceso implica una fase sólida biomasa (sorbente o adsorbente) y una fase líquida (solvente) que contiene las especies disueltas (adsorbatos) que van a ser retenidas por el sólido. Para que este proceso se lleve a cabo debe existir afinidad del adsorbente por los adsorbatos, para que estos últimos sean transportados hacia el sólido donde van a ser retenidos por diferentes mecanismos. Esta operación continúa hasta que se establece un equilibrio entre el adsorbato disuelto y el adsorbato enlazado al sólido. (7) Este método es menos costoso y admite un amplio rango de condiciones (pH, temperaturas, concentraciones) si se le compara con las técnicas de precipitación, intercambio iónico, absorción con carbón activado, diálisis u ósmosis inversa.

Existen diferentes factores que influyen en el proceso de bioadsorción, los cuales se detallan a continuación:

- **Propiedades del adsorbato:** la preferencia se relaciona con la electronegatividad del metal y el valor de la constante de equilibrio en la primera reacción de hidrólisis del metal. Además, para los iones metálicos, se tienen en cuenta la escala de dureza. Los iones duros como Cr^{+3} , tienen preferencia por ligandos o grupos funcionales que contienen oxígeno (grupos OH^- , $\text{C}=\text{O}$, R-COO^-) y tendrán interacciones de tipo electrostático.

- **pH:** los pH extremos pueden dañar las estructuras de los materiales adsorbentes afectando la solubilidad del metal en disolución. Entre los grupos funcionales comunes de los adsorbentes naturales se encuentran los grupos hidroxilo (-OH), carboxilo (-COOH), sulfhidrilo (-SH), entre otros, en donde un cambio del pH, cambia el estado de estos grupos, modificando la interacción con los contaminantes. El efecto del pH también está relacionado con la química del metal en solución, el tipo y el estado iónico del grupo funcional presente en el adsorbente. Por lo tanto, a un pH bajo la superficie del material se carga positivamente, inhibiendo la aproximación de los cationes metálicos cargados positivamente ya que ocurre una competencia por parte de los iones H^+ en los sitios activos del adsorbente mientras que a un pH alto el metal tiende a precipitarse por la formación de hidróxidos metálicos. Demostrando que la adsorción de cationes es favorable para valores de pH en un rango de 1 a 7.
- **Concentración inicial del metal:** afecta de manera inversa la eficiencia de remoción ya que a mayor cantidad de soluto los sitios activos del adsorbente se saturan fácilmente, aumentando la cantidad de soluto dispuesto a ser retenido hasta que llega a la capacidad máxima de adsorción establecida por diferentes equilibrios de adsorción que se ponen en contacto con concentraciones distintas de metal los cuales dependen de condiciones experimentales y son diferentes para cada temperatura, generalmente descritos por modelos teórico.
- **Presencia de otros compuestos:** influye siempre y cuando se estén analizando muestras reales, las cuales pueden no solo contener únicamente iones metálicos, sino diferentes aniones y cationes metálicos, sustancias químicas, colorantes y demás, se genera una competencia por los sitios activos de la superficie del adsorbente. Esto depende de las condiciones de

la muestra, la concentración de los metales y la afinidad del adsorbente a cada uno de los iones metálicos.

- **Fuerza iónica:** el intercambio iónico envuelve las fuerzas atractivas de Coulomb entre los iones de la solución y los grupos funcionales del material adsorbente, estos últimos presentan iones de la misma carga que los contenidos en fase líquida, de tal forma que son capaces de ser intercambiados. Por lo que generalmente, la eliminación del metal aumenta al disminuir fuerza iónica, ya que los iones duros compiten con el metal por los sitios de enlace a través de procesos electrostáticos. Iones como Na^+ o Mg^{2+} incrementan la fuerza iónica de la disolución haciendo que la adsorción del metal disminuya. En otros casos, la presencia de sales da formación de complejos con el metal en disolución que modifica la capacidad de enlazarse a los grupos funcionales presentes en la biomasa
- **Temperatura:** afecta la interacción entre soluto y adsorbente y la velocidad de reacción, ya que, al haber un intercambio iónico, se requiere de un rango de temperatura constante, para que el proceso no se vea afectado. Un aumento de la temperatura cambia la textura del adsorbente generando una pérdida de la capacidad de adsorción. Esto se debe a que las moléculas ganan energía al ser calentadas permitiendo que esta energía escape estableciendo un proceso de desorción. La temperatura tiene una influencia directa en un rango de 20° a 60° C.
- **Tiempo de contacto:** a partir de este tiempo se puede determinar el tiempo óptimo para alcanzar la máxima capacidad de adsorción o tiempo de equilibrio entre la fase sólida y líquida. Depende también de otras condiciones como la concentración del contaminante o la dosis del adsorbente. Los

procesos de adsorción del metal tienen tiempos cortos, llegando al equilibrio en pocas horas e incluso minutos.

Para poder calcular el tiempo de contacto óptimo de una biomasa, se pueden probar diferentes tiempos de agitación en una solución acuosa con un contaminante. Al calcular la cantidad de contaminante adsorbido por la biomasa, denominado porcentaje de remoción, se puede graficar contra los tiempos de contacto. Por ejemplo, en la figura N° 3 el punto (A) corresponde al tiempo de contacto 10 minutos, y cuando se reporta el tiempo de contacto de 15 minutos (B) se observa un pequeño aumento, caso contrario cuando pasan 30 minutos (C), donde el porcentaje de remoción se mantiene casi constante. De esta forma, se concluye que el tiempo óptimo de contacto entre la biomasa y el contaminante en solución acuosa es de 15 minutos, ya que sería innecesario continuar agitando la solución sin lograr resultados significativos.

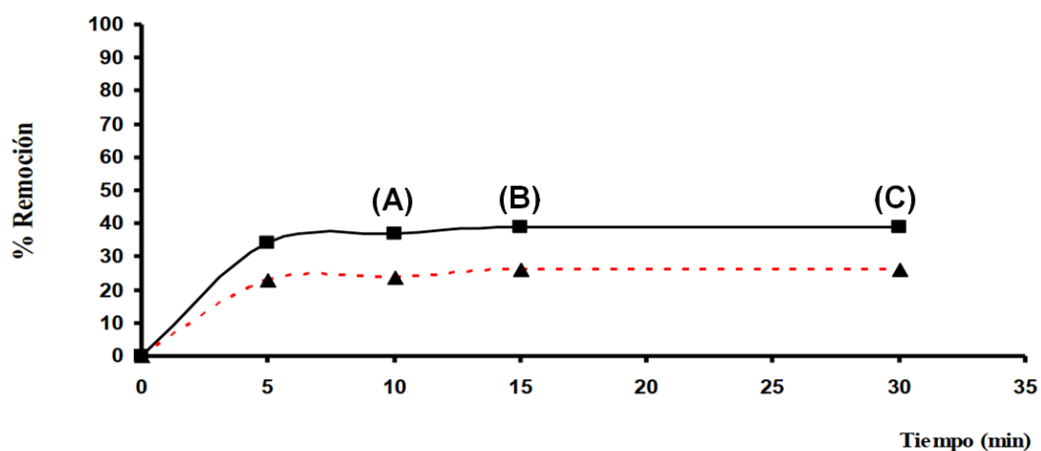


Figura N° 3. Ejemplo de estimación del tiempo de equilibrio del bioadsorbente⁽²⁴⁾

- **Tamaño de partícula:** presenta una influencia directa en el proceso de adsorción ya que a un menor tamaño del adsorbente hay una mayor afinidad

del bioadsorbente con el contaminante debido a que aumenta el área superficial y los sitios activos con los que el adsorbato tiene contacto. ⁽⁸⁾

- **Cinética de adsorción:** permite determinar la velocidad (en función del tiempo), el pH óptimo y el tipo de adsorbente (natural o modificado) para el análisis de concentración de los metales empleados en una solución acuosa, para un estudio en laboratorio. ⁽⁸⁾
- **Dosis del adsorbente:** es definida como la menor cantidad que permite la mayor eficiencia de remoción posible. Un aumento en la cantidad del adsorbente incrementa la eficiencia de remoción gracias a la existencia de una mayor área superficial y más sitios activos reteniendo el adsorbato. ⁽⁸⁾

Para poder calcular la dosis de biomasa, con la cual se logre la mayor adsorción, se puede calcular la cantidad de contaminante adsorbido por la biomasa, denominado porcentaje de remoción, luego se grafica contra las cantidades (g) de biomasa agregados. Por ejemplo, en la figura N° 4 el punto (A) corresponde a 0.2 g de bioadsorbente agregados, luego al agregar 0.3 g (B) se observa un leve aumento del porcentaje de remoción. Al pasar a agregar 0.6 g (C) no se observa aumento del porcentaje de remoción, razón por la cual se establece que la dosis mínima para llevar a cabo una adecuada bioadsorción es de 0.3 g, ya que sería innecesario continuar agregando biomasa la solución sin lograr resultados significativos.

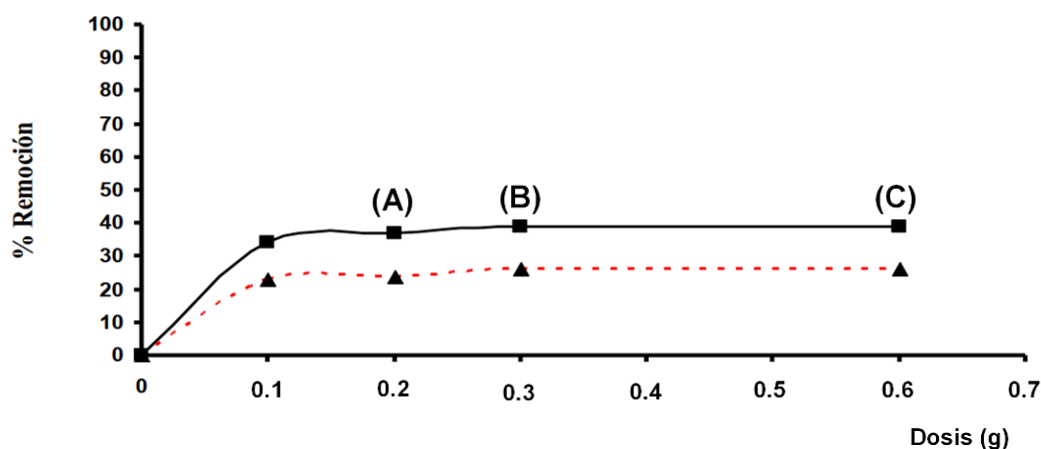


Figura N° 4. Ejemplo del establecimiento de la dosis de bioadsorbente⁽²⁴⁾

3.2.8 Métodos para el análisis cuantitativo de cromo

Existen muchas técnicas para analizar y cuantificar el cromo. Una alternativa viable es la espectroscopia visible ultravioleta, que se emplea en el análisis cualitativo y cuantitativo de compuestos orgánicos e inorgánicos, pues un buen número de sustancias tienen bandas de absorción en esta zona del espectro electromagnético. La espectrometría visible-ultravioleta se basa en la absorción y emisión de radiación, la cual es debida a una reestructuración de los electrones de átomos o moléculas. La región del espectro electromagnético empleado para Ultravioleta Visible se encuentra entre el rango de 10 a 780 nm.

Para hacer este tipo de medidas se emplea un espectrofotómetro el cual tiene la capacidad de proyectar un haz de luz monocromática (de una longitud de onda particular) a través de una muestra y medir la cantidad de luz que es absorbida por dicha muestra. Como también la relación de la intensidad del color en una muestra y su relación a la cantidad de soluto dentro de la misma. Se pueden identificar y cuantificar moléculas en solución y en muestras biológicas, con el empleo de reactivos específicos que reaccionan con el compuesto a analizar y forman un producto coloreado que permite detectarlo en muestras complejas,

este método se le llama Método Colorimétrico. (7)

El método colorimétrico específicamente para el análisis de cromo hexavalente en solución se basa en una técnica en la cual es empleada la reacción del cromo hexavalente con 1,5-difenilcarbazida en medio ácido, lo que produce la formación de un compuesto desconocido de color rojo violeta. Éste puede ser medido espectrofotométricamente a una longitud de onda de 540 nm y la absorbancia es proporcional a la concentración de cromo en la muestra. (7)

3.3 Isotermas de adsorción

Describen el comportamiento de la interacción entre adsorbato-adsorbente proporcionando información sobre la capacidad de adsorbente analizado. (16) Si existe una afinidad del adsorbente por el adsorbato, éste es atraído continuando el proceso hasta establecer el equilibrio entre el adsorbato disuelto y el adsorbato enlazado al sólido a una determinada concentración final en la fase líquida. Este equilibrio de bioadsorción es descrito por modelos que relacionan la cantidad retenida del adsorbato y la que permanece en disolución cuando alcanza el equilibrio a una temperatura constante dado por ecuaciones denominadas “isotermas de adsorción”.

Las isotermas de adsorción son la relación de dependencia a una temperatura constante, de la cantidad del peso unitario del adsorbente con respecto a la concentración del adsorbato en equilibrio. Para el cálculo se pueden considerar el uso de estos modelos teniendo en cuenta las concentraciones iniciales y finales de los ensayos, así como la masa de la muestra empleada. Los modelos más conocidos son las isotermas de Langmuir y Freundlich. (17)

3.3.1 Isotermas de Langmuir

El modelo Langmuir se usa generalmente para adsorción de un soluto desde una fase líquida. La atracción entre los iones y la superficie del material adsorbente se basa en fuerzas electrostáticas o de Van der Waals por lo que la adsorción ocurre en lugares específicos de la superficie del adsorbente, una vez que el ion metálico ocupa un lugar no puede ocurrir otra adsorción en ese sitio (adsorción de monocapa con distribución homogénea), una vez saturada alcanza el equilibrio. (18)

Además, hay un cambio de energía libre para todos los sitios de adsorción considerando que no hay interacción adsorbente-adsorbato. El modelo de Langmuir se describe mediante la ecuación N° 1, siendo esta la linealizada:

$$\frac{C_f}{q_e} = \frac{1}{T_r} C_f + \frac{1}{Q_L T_r} \quad (\text{Ecuación N}^\circ 1)$$

En donde: “ C_f ” es la concentración final de Cr (VI) en mg/L, “ q_e ” es la capacidad de adsorción en mg de Cr (VI) / g de biomasa, “ T_r ” es la tasa máxima de retención (mg/g), y “ Q_L ” es constante de equilibrio (L/mg).

Para ello es necesario calcular la capacidad de adsorción (q_e) que será removida por el adsorbente mediante la ecuación N° 2.

$$q_e = \frac{(C_i - C_f) \times V}{W} \quad (\text{Ecuación N}^\circ 2)$$

En donde: “ q_e ” es la capacidad de adsorción en mg de Cr (VI) / g de biomasa, “ C_i ” es la concentración de Cr (VI) en mg/L (sin agregar biomasa), “ C_f ” es la concentración final de Cr (VI) en mg/L (al agregar la biomasa), “ V ” es el volumen de la fase acuosa en L, y “ W ” es el peso (g) de la biomasa agregada.

Además, la ecuación de la isoterma de Langmuir linealizada relaciona la adsorción en una superficie sólida con la concentración de un medio que se encuentre encima de ésta. Para ello, se grafica C_f (eje x) versus $\frac{C_f}{q_e}$ (eje y), y se realiza una regresión lineal, obteniendo la ecuación de la recta ($y=mx+b$). Partiendo de ella podemos calcular valores de T_r y Q_L , según la ecuación N° 3 y 4 respectivamente.

$$T_r = \frac{1}{m} \quad (\text{Ecuación N}^\circ 3) \quad Q_L = \frac{1}{bT_r} \quad (\text{Ecuación N}^\circ 4)$$

En donde: " T_r " es la tasa máxima de retención ($\text{mg}_{\text{adsorbato}}/\text{g}_{\text{adsorbente}}$), " m " es la pendiente de la recta, " Q_L " es constante de equilibrio (L/mg), y " b " es el intercepto.

A partir de esta ecuación linealizada de Langmuir, es posible calcular la constante de afinidad (R_L) que es un parámetro muy importante que nos ayudara a indicar que tan favorecida se encuentra la adsorción. Ésta se calcula mediante la ecuación N°5:

$$R_L = \frac{1}{1 + (Q_L \times C_i)} \quad (\text{Ecuación N}^\circ 5)$$

En donde: " R_L " indica el cuan favorecida se encuentra la adsorción, " Q_L " es la constante de equilibrio, " C_i " es la concentración inicial de Cr (VI) en mg/L .

El resultado de R_L nos indica el tipo de isoterma de adsorción, ya sea favorable ($0 < R_L < 1$), lineal ($R_L = 1$), desfavorable ($R_L > 1$) o irreversible ($R_L = 0$).⁽¹⁹⁾

3.3.2 Isotherma de Freundlich

Este modelo es válido para superficies heterogéneas, y predice un aumento en la concentración de las especies iónicas adsorbidas en la superficie del sólido

cuando aumenta la concentración de determinadas especies en la fase líquida. Además, establece que la energía de adsorción disminuye exponencialmente en el punto final de los centros de adsorción de un adsorbente. (8) La ecuación N° 6 muestra la ecuación linealizada de la Isoterma de Freundlich.

$$\log q_e = \left(\frac{1}{n}\right) \log C_f + \log Q_F \quad (\text{Ecuación N° 6})$$

En donde: “ q_e ” es la capacidad de adsorción en mg de Cr (VI) / g de biomasa, “ n ” es la constante relacionada con la intensidad de adsorción en función de su grado de heterogeneidad, “ C_f ” es la concentración final de Cr (VI) en mg/L, y “ Q_F ” es la constante de Freundlich en mg/g

Para la isoterma de Freundlich se gráfica, $\log C_f$ (eje x) versus $\log q_e$ (eje y), realizando una regresión lineal se obtiene la ecuación de la recta ($y=mx+b$). Partiendo de ésta se pueden obtener los valores de “ n ” y “ Q_F ”, como observa en las ecuaciones N° 7 y 8 respectivamente:

$$\frac{1}{n} = m \quad (\text{Ecuación N° 7}) \quad Q_F = 10^b \quad (\text{Ecuación N° 8})$$

En donde: “ $1/n$ ” es una medida de la intensidad de adsorción, directamente asociada a la eficiencia de la adsorción, denominado también factor de heterogeneidad, “ m ” es la pendiente de la recta, “ Q_F ” es un indicador aproximado de la capacidad de adsorción denominada constante de Freundlich, y “ b ” es el intercepto.

Teniendo que valores de $0 < 1/n < 1$ indican una adsorción favorable. (18,19)

3.4 pH en el Punto de Carga Cero (pHPCC)

Los puntos de carga cero (PCC) son valores de pH donde los componentes de carga superficial se vuelven iguales a 0 bajo dado condiciones de temperatura, presión aplicada y composición de la solución acuosa. Esto no significa que la

superficie no tiene carga a pH_{PCC}, sino que hay cantidades iguales de cargas positivas y negativas valores PCC podría ayudar a optimizar la selección de un sustrato para el tratamiento de soluciones contaminadas. Los sustratos con valores bajos de PCC serían más adecuado para tratar efluentes contaminados con cationes, mientras que sustratos con valores altos de PCC serían más apropiados para capturar aniones. Es un parámetro son muy valiosos para determinar la afinidad particular de un determinado adsorbente por un adsorbato específico. (20)

Se describen al menos tres puntos diferentes de carga cero en la literatura: el PCC, el punto de carga neta cero (PCNC), y el punto de carga neta de protones cero (PCNPC). El PCC es el valor de pH para el cual la carga superficial neta es nulo y el enjambre de iones difusos se desvanece. También se le llama el punto isoelectrico (PEI) porque, a este valor de pH, las partículas no se mueven cuando esté expuesto a un campo eléctrico. El PCNC es el valor de pH para el cual la red la carga debida a los iones adsorbidos, distintos de H⁺ y OH⁻, es igual a 0. Corresponde al pH donde la capacidad de intercambio aniónico (AEC) y la capacidad de intercambio catiónico (CEC) del sustrato son equivalentes). El PCNPC es el valor de pH para el cual la carga neta debida a H⁺ y los iones OH⁻, acomplejados por grupos funcionales de superficie, son nulos. (21)

Algunas investigaciones se han enfocado a la determinación del pH (PPC) de diferentes materiales orgánicos como algas (PCC 7.12), compost (PCC 7.5), aserrín (PCC4.7), cenizas de madera (PCC 1.5), cáscaras de yuca (PCC 6.37), *Opuntia ficus indica* (PCC 4.3), entre otros, los cuales se han usado para la remoción de contaminantes en aguas, confirmando la importancia de estos parámetros en lo referente al tratamiento adecuado de efluentes líquidos. No obstante, la determinación de los parámetros PCC ha sido poco explorada en los residuos agroindustriales. (22)

CAPITULO IV

4.0 DISEÑO METODOLÓGICO

4.1 Tipo de estudio

Experimental: el presente estudio se desarrolló de junio a agosto de 2022 en el Laboratorio de Química Analítica Ocupacional y Ambiental de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador, donde se realizaron ensayos sobre la biomasa de los cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose. Se obtuvo el espectro FT-IR de la biomasa, se estableció el pH en el punto de carga cero (pHPCC), se verificó el tiempo de equilibrio donde la biomasa adsorbió la máxima cantidad de Cr (VI), se probó la concentración de biomasa adecuada para alcanzar la máxima remoción de Cr (VI), y se obtuvieron las constantes correspondientes mediante las isothermas de adsorción de Langmuir y Freundlich.

4.2 Investigación bibliográfica:

La revisión bibliográfica se realizó sobre todo en las siguientes fuentes:

- Dr. Benjamín Orozco de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador
- Central de la Universidad de El Salvador
- Consorcio de Bibliotecas Universitarias de El Salvador (CBUES)
- Repositorio Institucional de la Universidad de El Salvador
- Portal Regional de la Biblioteca Virtual en Salud (BVS)
- Internet

4.3 Universo y muestra

4.3.1 Universo: *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose.

4.3.2 Muestra de cladodios secos de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose

La muestra de biomasa para este estudio se tomó de una investigación realizada en el año 2020 por estudiantes de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador, para optar al grado de Licenciada en Química y Farmacia, denominada “Evaluación del uso de cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose como sustrato bioadsorbente para la remoción de cromo (VI) en disolución acuosa” (7). La obtención del sustrato conllevó los procesos de recolección, identificación de la muestra vegetal recolectada, secado, molienda, tamizado, determinación del diámetro de partícula y determinación de contenido de cromo en muestra vegetal fresca y seca.

La muestra de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose que posee las características deseadas para facilitar su identificación, como: cladodios, flor y fruto, fue recolectada por Sergio Maravilla, Raquel Crespín y Diana Elías, en el mes de mayo de 2019, en el municipio de Mejicanos departamento de San Salvador (13°43'52.7"N, 89°12'54.5"W) y luego fue transportada al Herbario del Museo de Historia Natural de El Salvador para su identificación botánica, realizada por la Licenciada Jenny Menjívar, quien asignó el número de voucher de la planta en estudio (J. Menjivar *et al* 5143), que garantizó que la muestra es de la especie deseada (Ver anexo N° 1).

Luego de su identificación, le realizaron un procesamiento que consistió en lavar los cladodios con agua destilada, cortarlos en trozos pequeños de aproximadamente 10 cm; luego fueron colocados en bandejas metálicas y se introdujeron en una estufa Thermo Scientific, durante 72 horas, para luego ser sometidos al proceso de secado. Dicho proceso se inició con una temperatura de 54 °C durante 24 horas y 50 °C las 48 horas posteriores.

Los cladodios deshidratados los molieron, y el material resultante lo tamizaron empleando un tamiz plástico de aproximadamente 500 μm de abertura de orificio, obteniendo 2 tamaños de partícula (el que pasó a través del orificio de malla, “diámetro menor”, y el retenido “diámetro mayor”). Luego le realizaron la determinación de diámetro de partícula la cual fue realizada en el Laboratorio de Vectores del Centro de Investigación y Desarrollo en Salud (CENSALUD), ubicado en el Campus Universitario Central, donde se utilizó un microscopio óptico acoplado a cámara para microscopio, con el cual se obtuvieron microfotografías, empleando el objetivo 4x (10 mm). Obteniendo resultados de tamaños de partícula Diámetro Mayor igual a 0.531 mm y Diámetro Menor de 0.151 mm.⁽⁷⁾

A la biomasa se le determinó la cantidad de cromo que tenían tanto los cladodios frescos como ya secos, dicha determinación se realizó en el Laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, obteniéndose que, para los cladodios frescos una concentración de cromo de 1.72 ppm y para los cladodios secos y molidos una concentración de cromo de 1.79 ppm, estos resultados pueden decirnos que no hay diferencia significativa de concentración de cromo tanto para los cladodios frescos como secos.⁽⁷⁾

Por lo tanto, para la presente investigación se seleccionó la biomasa de 0.151mm de diámetro, debido a que el tamaño de partícula es un factor determinante en el proceso de adsorción que está relacionado con la superficie de contacto. Esto significa que, a menor tamaño de partícula, mayor interacción y afinidad entre el contaminante y el adsorbente. ⁽⁸⁾

4.4 Parte experimental

A continuación, se presentan la metodología de la investigación, desde la lectura del espectro FT-IR hasta la obtención de las constantes de las isotermas de Langmuir y Freundlich. En el anexo N° 2 se presentan fotografías de algunos procedimientos realizados en el laboratorio.

4.4.1 Identificación los principales grupos funcionales de la biomasa de cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose.⁽⁹⁾

- a. Pesar con una espátula aproximadamente 0.1 gramos de la biomasa de los cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose con diámetro de partícula promedio de 0.151 mm.
- b. Colocar la biomasa en el accesorio ATR iD7 de cristal de diamante del Espectrómetro FT-IR Thermo Scientific Nicolet iS5.
- c. Con el software Thermo Scientific™ OMNIC™ obtener el espectro en 16 escaneos a una resolución espectral de 4 cm⁻¹.
- d. Retirar la biomasa del accesorio ATR y limpiar con etanol y un pañuelo desechable.
- e. Con el software Thermo Scientific™ OMNIC™ añadir los picos característicos de los grupos funcionales según el número de onda correspondiente.
- f. Identificar los grupos funcionales en el espectro FT-IR.

4.4.2 Determinación del pH en el Punto de Carga Cero (pHPCC) de la biomasa de cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose.⁽⁹⁾

- a. Preparar 50.0 mL de soluciones a pH 2, 4, 6, 8, 10 y 12 haciendo uso de NaOH 2N o HCl 2N según corresponda.
- b. Medir el pH de cada una con pH-metro Denver Instrument UB-10 y anotar el valor como (pH_{inicial})

- c. A cada solución, agregar 0.100 gramos de biomasa de los cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose y agitar por 15 minutos.
- d. Medir el pH resultante con pH-metro (pH_{final}).
- e. Realizar este procedimiento por triplicado, y obtener el promedio de $\text{pH}_{\text{inicial}}$ y pH_{final} .
- f. Con estos promedios de los valores de pH, calcular el cambio de pH (ΔpH) mediante la ecuación N° 9.

$$\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{final}} - \text{pH}_{\text{inicial}} \quad (\text{Ecuación N}^\circ 9)$$

- g. Elaborar una gráfica de $\text{pH}_{\text{inicial}}$ (eje x) versus ΔpH (eje y).
- h. El pH_{PCC} se determina cuando el ΔpH es igual a cero (0.00).
- i. En el anexo N° 3 se muestra el esquema de trabajo.

4.4.3 Elaboración de curva de calibración para cuantificación de Cr (VI) ⁽²³⁾

- a. Colocar en una cápsula de porcelana aproximadamente 1.00 g de dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) y secar en estufa por 2 horas a 105 ± 1 °C.
- b. Sacar de la estufa y colocar en desecador por 30 minutos.
- c. En balanza analítica, pesar 0.1415 gramos de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, disolver y aforar a 100.0 mL con agua desmineralizada, obteniéndose una solución a 500 mg/L de Cr (VI), denominada solución madre.
- d. De la solución madre, tomar alícuota de 1.0 mL y aforar con agua hasta 100.0 mL, obteniéndose una solución de 5 mg/L de Cr (VI).
- e. A partir de la solución de 5 mg/L de Cr (VI), preparar 100.0 mL de los estándares al 0.10, 0.25, 0.50, 0.75 y 1.00 mg/L de Cr (VI).
- f. Transferir cuantitativamente los 100.0 mL a un beaker de 250 mL, y agregar gota a gota ácido sulfúrico (H_2SO_4) 2N, hasta pH aproximado de 2.0, utilizando papel pH, medio en el que la 1,5-difenilcarbazida (DFC) desarrolla su color.

- g. Agregar 2.0 mL de DFC (0.5 gramos en 100.0 mL de acetona) a cada estándar, y agitar manualmente. Reposar de 5 a 10 minutos para que se desarrollara el color (rosado).
- h. Preparar un blanco con 100.0 mL de agua desmineralizada y llevarlo a pH 2.0 con H₂SO₄ 2N. Agregarle 2.0 mL de DFC y reposar de 5 a 10 minutos.
- i. En espectrofotómetro visible portátil HACH DR-2700, medir las absorbancias de los estándares utilizando el blanco preparado para llevar a CERO el equipo, a una longitud de onda de 540 nm.
- j. Realizar el procedimiento del apartado 4.4.3 desde el literal (a) al (i) por triplicado y promediar las absorbancias obtenidas para cada concentración de estándar.
- k. Elaborar una gráfica de mg/L de Cr (VI) (eje x) versus el promedio de las absorbancias (eje y).
- l. Mediante una regresión lineal, obtener el coeficiente de determinación (R²) y la ecuación de la recta (y=mx+b).
- m. Con la ecuación N° 10, calcular las concentraciones de Cr (VI) en los diferentes ensayos.

$$x = \frac{y - b}{m} \quad (\text{Ecuación N}^\circ 10)$$

- n. En el anexo N° 4 se muestra el esquema de trabajo.

4.4.4 Influencia de la concentración de la biomasa de cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose en la remoción de Cr (VI). ⁽⁹⁾

- a. Preparar 7 soluciones al 0.50 mg/L de Cr (VI) de 100.0 mL cada una en balón volumétrico.
- b. Transferir cuantitativamente los 100.0 mL a un beaker de 250 mL.
- c. Pesar en una balanza analítica y agregar 0.00, 0.01, 0.1, 0.25, 0.5, 1.0 y 1.5 g de biomasa a cada solución.
- d. Agitar por 60 minutos.
- e. Filtrar por gravedad utilizando algodón para retener la biomasa.

- f. Preparar un blanco con 100.0 mL de agua desmineralizada.
- g. En un espectrofotómetro visible portátil HACH DR-2700, medir las absorbancias de las muestras (Abs-DFC) utilizando el blanco preparado para llevar a CERO el equipo, a una longitud de onda de 540 nm.
- h. Agregar gota a gota ácido sulfúrico (H₂SO₄) 2N hasta obtener un pH aproximado de 2.0 utilizando papel pH. Agregar además 2.0 mL de DFC a cada muestra y agitar manualmente. Reposar de 5 a 10 minutos hasta que se desarrolló el color (rosado).
- i. Al blanco, agregar gota a gota ácido sulfúrico (H₂SO₄) 2N hasta obtener un pH aproximado de 2.0 utilizando papel pH. Agregar además 2.0 mL de DFC a cada muestra y agitar manualmente.
- j. En un espectrofotómetro visible portátil HACH DR-2700, medir las absorbancias de las muestras (Abs+DFC) utilizando el blanco preparado para llevar a CERO el equipo, a una longitud de onda de 540 nm.
- k. Utilizar las absorbancias de las muestras Abs+DFC y Abs-DFC para calcular la absorbancia final mediante la ecuación N° 11.

$$A_{(\text{Abs Final})} = A_{(\text{Abs+DFC})} - A_{(\text{Abs-DFC})} \quad (\text{Ecuación N° 11})$$

- l. Calcular la concentración de cromo (VI) para cada absorbancia mediante la ecuación N° 10.
- m. Calcular el porcentaje de remoción de Cr (VI) mediante la ecuación N° 12.

$$\%R = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100 \quad (\text{Ecuación N° 12})$$

En donde: “%R” es el porcentaje de remoción de Cr (VI), “C_i” corresponde a la concentración de Cr (VI) en mg/L (sin agregar biomasa), “C_f” se refiere a la concentración final de Cr (VI) en mg/L calculada según el apartado 4.4.4 literal (l).

- n. Se realizó el procedimiento del apartado 4.4.4 desde el literal (a) al (m) por triplicado.

- o. Promediar los valores de %R de cada concentración (eje y) y graficar versus los gramos de biomasa agregados (eje x)
- p. La concentración en la que se alcanzó la máxima remoción de Cr (VI) se toma en el punto que la curva empieza a mantenerse constante.
- q. En el anexo N° 5 se muestra el esquema de trabajo.

4.4.5 Tiempo de equilibrio para alcanzar la máxima remoción de Cr (VI) de los cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose. ⁽²⁴⁾

- a. Preparar partir de la solución de 5 mg/L de Cr (VI), 6 soluciones de 100.0 mL cada una de las siguientes concentraciones: 0.1, 0.25, 0.50, 0.75 y 1.00 mg/L de cromo (VI).
- b. Trasferir cuantitativamente los 100.0 mL a un beaker de 250 mL, y agregar gota a gota ácido sulfúrico (H₂SO₄) 2N, hasta obtener un pH aproximado de 2.0, utilizando papel pH.
- c. Para obtener las concentraciones iniciales, tomar una solución de cada concentración y agregarle 2.0 mL de DFC. Agitar manualmente y reposar de 5 a 10 minutos para que se desarrolle el color (rosado).
- d. Preparar un blanco con 100.0 mL de agua desmineralizada y llevar a pH 2.0 con H₂SO₄ 2N. Agregar 2.0 mL de DFC y reposar de 5 a 10 minutos.
- e. En un espectrofotómetro visible portátil HACH DR-2700, medir las absorbancias de las muestras utilizando el blanco preparado para llevar a CERO el equipo, a una longitud de onda de 540 nm.
- f. Para obtener las concentraciones finales, tomar las 5 soluciones a 0.1 mg/L de Cr (VI), agregarle los gramos de biomasa (1.0g) necesarios para alcanzar la máxima retención de Cr (VI) que fue determinado en el apartado 2.5.4 literal (k).
- g. La primera solución agitarla por 5 minutos, la segunda por 10 minutos, la tercera por 15 minutos, la cuarta por 30 minutos y la quinta por 60 minutos.

- h. Inmediatamente transcurrido el tiempo de agitación de cada solución, filtrar por gravedad utilizando algodón para retener la biomasa. Agregar 2 mL de DFC, agitar manualmente y reposar de 5 a 10 minutos para que se desarrolle el color (rosado).
- i. Seguir el procedimiento del apartado 4.4.5 literal (d) y (e).
- j. Repetir el procedimiento del apartado 4.4.5 desde el literal (f) al (h) para las concentraciones de 0.25, 0.50, 0.75 y 1.00 mg/L de Cr (VI).
- k. Utilizando todas las absorbancias medidas, calcular la concentración de Cr (VI) con la ecuación N° 10.
- l. Con las concentraciones obtenidas, calcular el %R con la ecuación N° 12.
- m. Realizar el procedimiento del apartado 4.4.5 desde el literal (a) al (l) por triplicado.
- n. Promediar los valores de %R de cada concentración (eje y) y graficar versus los tiempos evaluados (eje x).
- o. El tiempo en la que se alcanza la máxima remoción de Cr (VI) (tiempo de equilibrio) es el punto en que la curva empezó a mantenerse constante en todas las concentraciones evaluadas.
- p. En el anexo N° 6 se muestra el esquema de trabajo.

4.4.6 Determinación de las constantes de adsorción de los cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose.⁽²⁴⁾

Luego de estimar el tiempo de equilibrio según el apartado 4.4.5 literal (o), se seleccionaron los promedios de los pesos de biomasa, las concentraciones iniciales y finales de Cr (VI) para dicho tiempo, y procedió a calcular las isothermas de Langmuir y Freundlich.

Isoterma de Langmuir:

- a. Calcular q_e mediante la ecuación N° 2.
- b. Graficar C_f (eje x) versus $\frac{C_f}{q_e}$ (eje y).

- c. Realizar una regresión lineal y obtener la ecuación de la recta ($y=mx+b$).
- d. Calcular “ T_r ”, “ Q_L ” y “ R_L ” mediante las ecuaciones N° 3, 4 y 5 respectivamente.

Isoterma de Freundlich:

- a. Calcular el logaritmo base 10 de C_f y q_e , y se graficó $\log C_f$ (eje x) versus $\log q_e$ (eje y).
- b. Realizar una regresión lineal y obtener la ecuación de la recta ($y=mx+b$).
- c. Calcular “ n ” y “ Q_F ” mediante las ecuaciones N° 7 y 8 respectivamente.

4.6 Plan de análisis

Todos los datos se tabularon en Microsoft Excel 2016. En éste se calcularon las variables de la investigación, por ejemplo, concentración inicial y final de Cr (VI), absorbancias finales, porcentaje de remoción, constantes de las isothermas, etc.; y de cada una se reportaron sus valores individuales y promedios para las 3 repeticiones. Además, se elaboraron las gráficas para el pHPC, curva de calibración, dosis, tiempo de contacto e isothermas de Langmuir y Freundlich. Según correspondía, se obtuvo automáticamente una regresión lineal con la ecuación de la recta y coeficiente de determinación (R^2).

CAPITULO V

5.0 RESULTADOS Y DISCUSION DE RESULTADOS

5.1 Grupos funcionales de la biomasa de cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose

Posterior al análisis de la biomasa por espectroscopia FT-IR, se obtuvo el espectro en la región de 400 a 4000 cm^{-1} , mostrado en la figura N° 5.

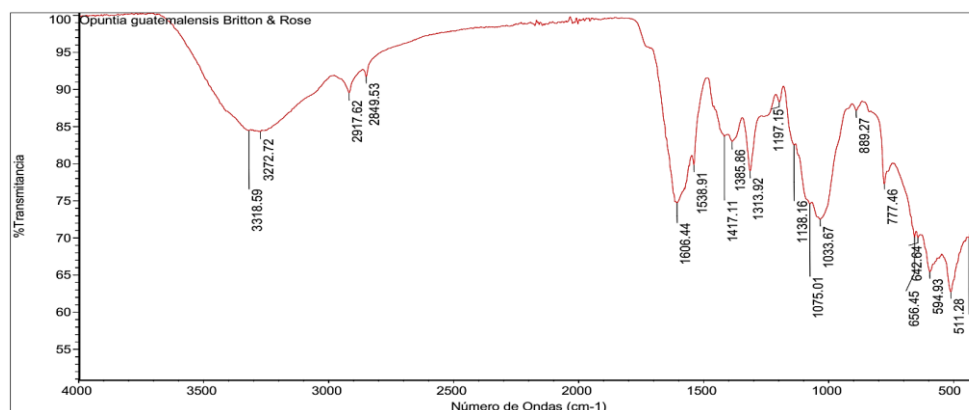


Figura N° 5. Espectro FT-IR, *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose (creación propia)

Se observa una banda a un número de onda de 3272.72 cm^{-1} atribuido a las vibraciones de estiramiento O–H, indicando la presencia de ácido carboxílico y grupos amino. Otra banda a 2917.62 cm^{-1} , corresponde a la vibración asimétrica de enlace –CH de los grupos alifáticos. Además, la banda a 2849.53 cm^{-1} se debe al grupo metoxi (CH₃–O). Por otra parte, el estiramiento que se observa a 1606.44 cm^{-1} se debe al doble enlace carboxílico C=O. A número de onda 1417.11 cm^{-1} corresponde al grupo fenólico –OH y –C=O de carboxilatos. A 1385.85 cm^{-1} se debe al estiramiento del –COO, mientras que a 1033.67 cm^{-1} se atribuye a –C–O–C y –OH (9, 27, 22).

De esta forma, las bandas ubicadas a 1033.67 cm^{-1} pertenecen a los grupos polisacáridos que contiene la muestra (celulosa, hemicelulosa y lignina). Se sabe que los cladodios del cactus están constituidos principalmente por un heteropolisacárido con un peso molecular de 23104 a 3106 g/mol, mientras que

el mucílago es una mezcla de polisacáridos ácidos y neutros que consisten principalmente en arabinosa, galactosa, ácido galacturónico, ramnosa y xilosa (3); los cuales contienen grupos carboxílicos que probablemente permiten la adsorción de metales. Por ejemplo, en los cladodios de la *Opuntia ficus indica*, los responsables de la adsorción de plomo y cadmio son los grupos C=O presentes en los polisacáridos (27), quién puede actuar como donador de protones e involucrarse en la coordinación con iones metálicos (8). Un aspecto importante a destacar es que la muestra de cladodios secos de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose utilizada en esta investigación, demostró tener una concentración previa de 1.79 ppm de cromo (VI), lo que puede alterar la intensidad de los picos en el espectro FT-IR.(7)

El espectro FT-IR de la *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose, es muy similar a la de *Opuntia ficus indica* (9, 27, 28), quienes comparten la presencia de polisacáridos. Por otra parte, al igual que la *Opuntia* otros materiales vegetales presentan grupos carboxílicos capaces de adsorber contaminantes, tal es el caso de la cascara de yuca en la remoción de azul de metileno. (22)

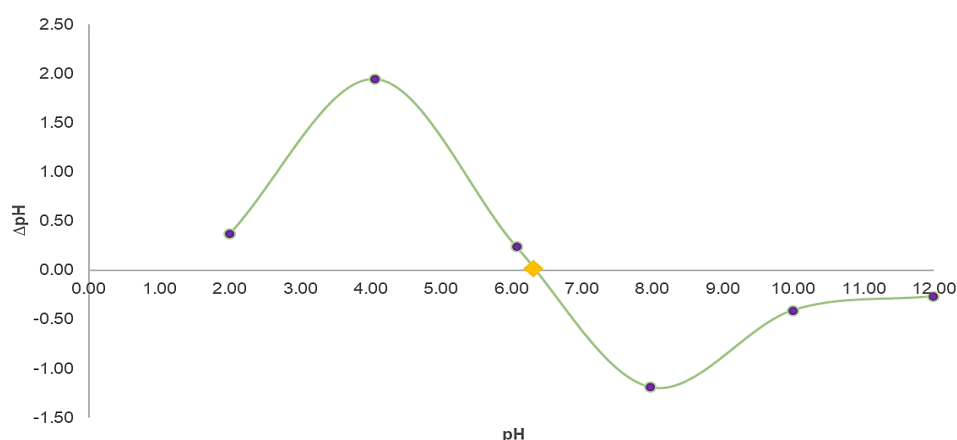
5.2 pH en el Punto de Carga Cero (pHPCC) de la biomasa de cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose

El pHPCC es el pH donde la carga superficial neta de la biomasa es cero, y mostrará la tendencia de la superficie bioadsorbente para cargarse positiva o negativamente dependiendo del pH donde se encuentre. En la tabla N° 4 se presenta el promedio del pH inicial, pH final (posterior al contacto entre la solución y la biomasa por 48 horas), mientras que en el anexo N° 7 se presentan todos los resultados completos para las 3 repeticiones.

Tabla N° 4. pH inicial, pH final y Δ pH para calcular el pHPCC (creación propia)

Promedio pH inicial	Promedio pH final	Δ pH
2.00	2.37	0.37
4.06	6.00	1.94
6.07	6.31	0.24
7.97	6.78	-1.19
9.99	9.58	-0.41
11.99	11.73	-0.26

Luego de graficar pH inicial versus Δ pH, se obtiene la gráfica presentada en la figura N° 6, en donde para la *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose el pHPCC es de 6.3, valor correspondiente al corte de la gráfica en el eje "X". Esto significa que a pH superiores a 6.3, la superficie de la biomasa se carga negativamente, logrando una mayor capacidad de adsorción debido a la creciente atracción electrostática entre las moléculas catiónicas como el Cr (VI) y los grupos funcionales de la biomasa (9). Además, cuando la adsorción se da a un pH mayor que el pHPCC, existe una menor disociación de las especies ácidas, por lo que hay menor cantidad de iones hidrógeno en solución que compitan con los cationes, dándose una mejor adsorción (28).

**Figura N° 6.** Gráfica de Δ pH versus pH para definir el pHPCC de los cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose (creación propia)

Por otra parte, la *Opuntia ficus indica* tiene un pHPCC de 4.3, lo que permite que al subir el pH se favorezca la bioadsorción de contaminantes catiónicos como el azul de metileno ⁽⁹⁾. Otros materiales vegetales, que también pueden ser utilizados como bioadsorbentes de contaminantes, muestran diferentes valores de pHPCC; por ejemplo la cáscara de yuca reporta un valor de 6.37, mientras que al ser modificada con ácido oxálico, el pHPCC baja a 2.47 ⁽²²⁾. La cáscara de mango presenta un valor de 4.4 ⁽²⁸⁾ al igual que la mazorca de maíz molida ⁽²⁹⁾ y 5.0 las semillas de colza ⁽³⁰⁾. Esta variación en los valores de pHPCC se debe a la naturaleza y composición de cada biomasa, y la elección para su uso dependerá de las condiciones y contaminante que se desee tratar.

5.3 Influencia de la concentración de la biomasa de cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose en la remoción de cromo (VI)

Para cuantificar el cromo (VI) antes y después de la adsorción con la biomasa de cladodios secos de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose, se elaboró una curva de calibración a partir de una sal de dicromato de potasio, utilizada para calcular las concentraciones de cromo (VI) y establecer la concentración de biomasa y estimar el tiempo de equilibrio al cual se lleva a cabo una mejor adsorción. A continuación, en la tabla N° 5 se presentan los promedios de la concentración inicial de Cr de cada estándar (ppm) y la absorbancia promedio. Los resultados completos de las absorbancias por triplicado se reportan en el anexo N° 8.

Tabla N° 5. Promedio de concentración de Cr y absorbancia promedio para la curva de calibración (creación propia)

ppm _{Cr (VI)}	Abs promedio
0.10	0.073
0.25	0.199
0.50	0.398
0.75	0.596
1.00	0.792

Con estos datos se elaboró la curva de calibración. En la figura N° 7 se observa la curva de calibración utilizando los 5 estándares de cromo (VI) y su respectiva absorbancia.

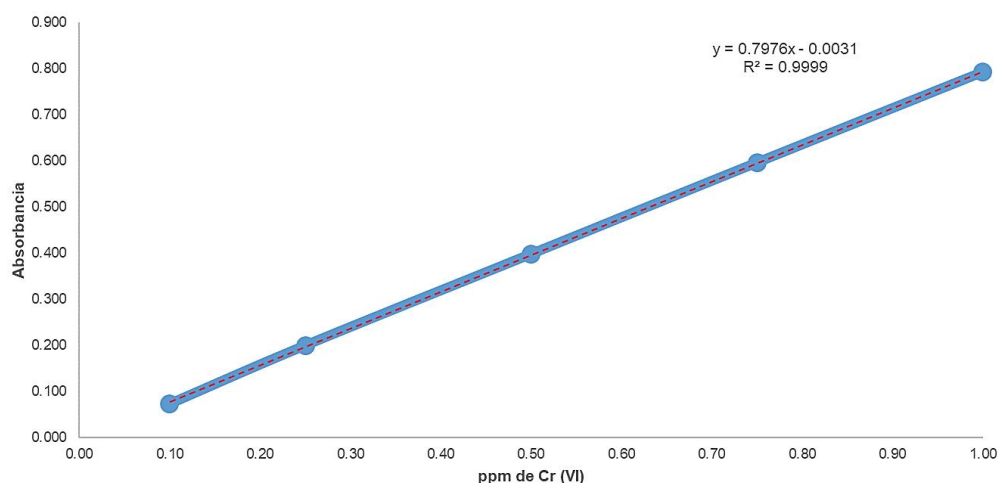


Figura N° 7. Curva de calibración de cromo (VI) (creación propia)

Al aplicar la regresión lineal a la curva obtenida, se obtiene una ecuación de la recta de $y = 0.7976x - 0.0031$, con un R^2 de 0.9999. Por lo tanto, para encontrar las concentraciones de cromo (VI) para toda la investigación se utilizó la ecuación N° 13.

$$\text{ppm}_{\text{Cr(VI)}} = \frac{\text{Absorbancia}_{\text{muestra}} + 0.0031}{0.7976} \quad (\text{Ecuación N° 13})$$

Debido a que el coeficiente de determinación (R^2) es cercano a 1, lo que significa una buena correlación entre la concentración de cromo (VI) y la absorbancia, por lo que los resultados son fiables ⁽³¹⁾. Este coeficiente de determinación es similar al determinado en la validación de cromo hexavalente en aguas residuales provenientes de curtiembres ⁽³²⁾ u otro tipo de aguas ⁽²³⁾.

Ahora bien, en cuanto el establecimiento de la influencia de la concentración biomasa en la remoción de cromo (VI), como se observa en la figura N° 8, al utilizar una dosis de 0.01g/100.0mL el porcentaje de remoción (%R) es de 10.5%, el cual aumenta proporcionalmente a una mayor cantidad de biomasa. Así, al utilizar 0.1g/100.0 mL el %R se eleva 31.9%, mientras que con 0.25g/100.0mL casi se alcanza la mitad de la remoción (48.7%). Por último, no hay mayor diferencia del %R en el punto donde se agregan 1.00g/100.0mL y 1.50g/100.0mL, con 90.6 y 93.8% respectivamente, lo que significa que con 1.00g/100.0mL se alcanza una remoción adecuada de cromo (VI) con el fin de optimizar la cantidad de biomasa partiendo de una concentración inicial de 0.50 ppm de Cr (VI). Los resultados completos de peso real, absorbancia con y sin DFC, absorbancia final, ppm de cromo (VI) y %R de todas las repeticiones, se reportan en el anexo N° 9.

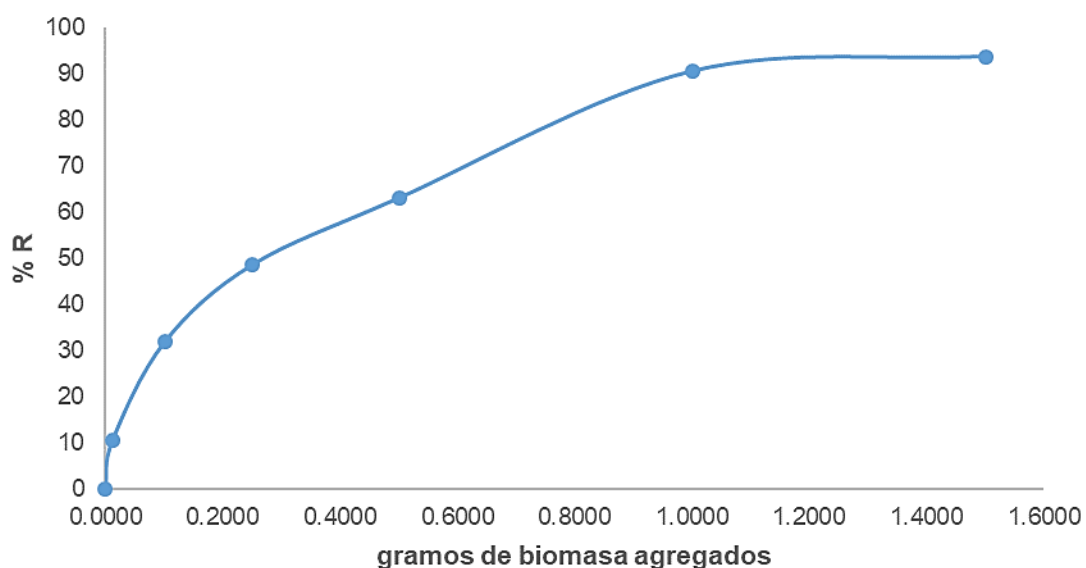


Figura N° 8. Gráfica de %R versus gramos de biomasa agregados para establecer la influencia de la concentración en la remoción de Cr(VI) (creación propia)

De forma similar, en otras investigaciones se encontró que para la *Opuntia ficus indica* el porcentaje de remoción de cromo (VI) oscilaba entre 51 a 98% para

dosis de 0.05 a 0.60 gramos/100.0mL respectivamente, con una dosis máxima recomendada de 0.40g/100.0mL donde no se observó un aumento en el rendimiento de la bioadsorción ⁽⁹⁾. Esta misma especie de cactus (*Opuntia ficus indica*) presenta una mejor remoción de Cadmio (II) a una dosis de 0.40g/100.0mL, y 1.00g/100.0mL para Plomo (II) adsorbiendo de mejor forma este último ⁽²⁷⁾. Otros materiales vegetales que pueden utilizarse como bioadsorbentes, muestran buenos resultados a dosis de 0.50g/100.0mL en el caso de cascara de yuca en la remoción de azul de metileno ⁽²²⁾, 0.25g/100.0mL de cascara de mango adsorbiendo cadmio (II) y plomo (II) ⁽²⁸⁾, 0.10g/100.0mL de residuos de arroz adsorbiendo cromo (VI) ⁽³³⁾. Todos estos resultados al compararlos con la *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose, dan indicios que el material vegetal, muchas veces producto de desecho de procesos industriales, pueden ser utilizados en la eliminación de contaminación de aguas residuales, disminuyendo el impacto en el medio ambiente.

5.4 Tiempo de equilibrio para alcanzar la máxima remoción de cromo (VI) usando los cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose

Otro de los parámetros importantes es el tiempo de contacto óptimo para alcanzar una adecuada remoción de cromo (VI). Como se observa en la figura N° 9, para las 5 concentraciones de Cr (VI) estudiadas (0.10, 0.25, 0.50, 0.75 y 1.00 mg/L) muestran una tendencia similar y con muy pocas diferencias en la remoción de cromo (VI); mostrando que la remoción se dio rápidamente en los primeros 5 minutos (entre 53.2 a 62.0%), y posteriormente sigue aumentando de forma gradual, pero a una velocidad más lenta. Esta fase inicial, puede atribuirse a la gran cantidad de sitios activos donde el Cr (VI) puede adherirse, los cuales empiezan a saturarse y tiende a disminuir la capacidad de remoción de la biomasa con el tiempo. Transcurrido un tiempo, se alcanza un punto donde la remoción ya no es significativa, y aunque el tiempo de contacto siga aumentando, los resultados no cambiarán en gran medida. En el caso de los cladodios secos

de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose, entre 15 y 30 minutos la diferencia de %R es de 10.3 puntos porcentuales, mientras que entre 30 a 60 minutos la diferencia de %R baja a tan solo 4.1 puntos porcentuales, ya que en promedio pasa de 82.4 a 86.5% de remoción respectivamente. Por lo tanto, el tiempo de contacto óptimo donde se logra una mejor adsorción de cromo (VI) es de 30 minutos.

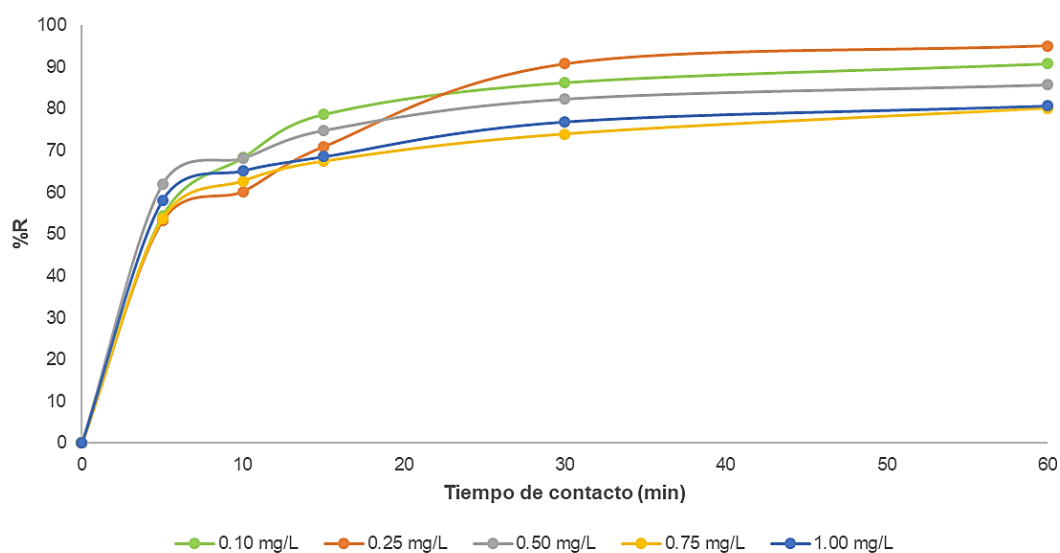


Figura N° 9. Gráfica de %R versus tiempo de contacto para estimar el tiempo de equilibrio para alcanzar la máxima remoción de Cr (VI) (creación propia)

Los resultados completos de peso real, absorbancia con y sin DFC, absorbancia final, concentraciones de cromo (VI) y %R de todas las repeticiones, para los tiempos de contacto de 0, 5, 10, 15, 30 y 60 minutos se reportan en los anexos N° 10, 11, 12, 13, 14 y 15 respectivamente.

De forma similar, en otros estudios se encontró que el tiempo de contacto óptimo para ecodermis de *Opuntia* en la remoción de cromo (VI) fue de 15 minutos (24), mientras que para los cladodios de *Opuntia ficus indica* se requieren de 120 minutos para alcanzar un porcentaje de remoción adecuado de azul de metileno (9), lo que significa que tanto la especie de *Opuntia* como el contaminante afecta

sobre el tiempo de equilibrio. Por otro lado, para la cascara de yuca el tiempo óptimo de contacto fue de 15 minutos para concentraciones bajas de azul de metileno, y 50 minutos para concentraciones altas (22). Éste fenómeno no sucede con la *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose, dado que para las 5 concentraciones estudiadas de Cr (VI) el tiempo de equilibrio se mantienen constante en 30 minutos.

5.5 Constantes de adsorción de los cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose mediante las isothermas de adsorción de Langmuir y Freundlich

Con los datos obtenidos de las diferentes concentraciones de cromo (VI) a un tiempo de contacto de 30 minutos, se ajustaron a los modelos de isothermas de Langmuir y Freundlich. Éstas describen la dependencia entre los iones metálicos adsorbidos y los de la fase acuosa en condiciones de equilibrio y temperatura constante. Son muy importantes para el diseño de un sistema de adsorción, ya su representación gráfica brinda información sobre la capacidad de adsorción (30). En la figura N° 10 se puede observar la gráfica de la isoterma de Langmuir, aplicando la regresión lineal para calcular la ecuación de la recta y el coeficiente de determinación (R^2). Así también en la figura N° 11 se reporta la gráfica de la isoterma de Freundlich con su respectiva ecuación de la curva y R^2 . Todos los resultados para el cálculo de las constantes de Langmuir, Freundlich y la constante de afinidad, se reportan en el anexo N° 16.

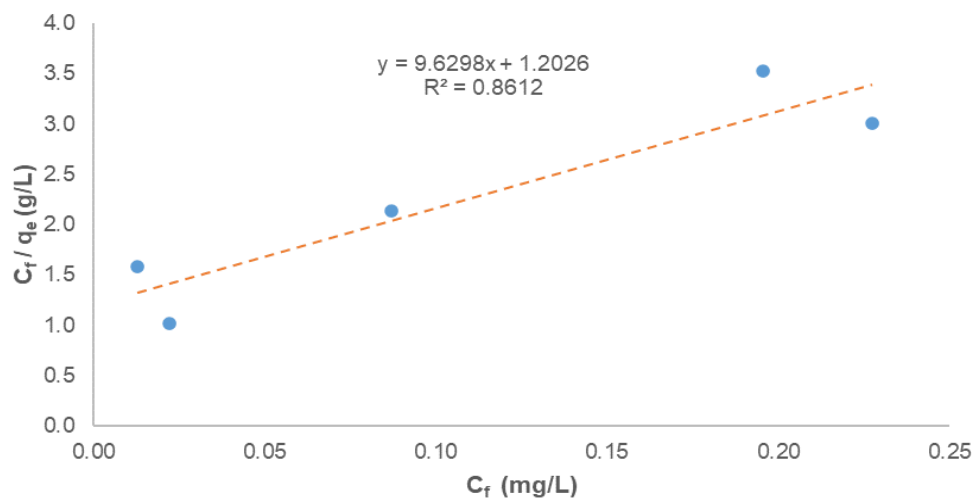


Figura N° 10. Gráfica de isoterma de adsorción de Langmuir (creación propia)

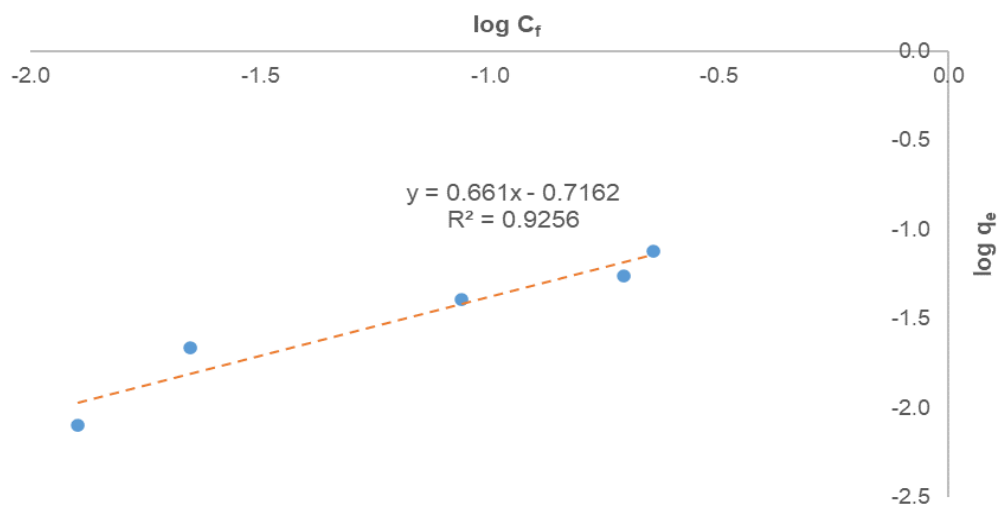


Figura N° 11. Gráfica de isoterma de adsorción de Freundlich (creación propia)

La isoterma de Langmuir describe una adsorción monocapa homogénea, donde todos los sitios activos (idénticos y en un número fijo) de la biomasa tienen la misma afinidad por el contaminante, sin interacción entre las moléculas de éste en el plano de la superficie ⁽²⁸⁾. Según la tabla N° 6, la tasa máxima de retención (T_r) es de 0.104 mg Cr(VI) por cada gramo de biomasa y la constante de equilibrio

(Q_L) de 8.007 L/mg. Por otra parte, el modelo de Freundlich explica la adsorción para superficies heterogéneas y asume que las moléculas adsorbidas interactúan con sus vecinos adyacentes pudiendo adsorberse primeramente en una monocapa y luego formar una multicapa, estableciendo además que la energía de adsorción se reduce exponencialmente con la disminución del número de sitios activos de un adsorbente ⁽²⁸⁾; donde el valor de $1/n$ (equivalente a la pendiente “m”) está relacionado con la intensidad de adsorción, mientras que la Q_F con la capacidad de bioadsorción. Las constantes para este modelo se reportan en la tabla N° 6 donde la intensidad de adsorción en función de su grado de heterogeneidad ($1/n$) fue 0.661 y la constante de Freundlich (Q_F) 32.573 mg/g.

Al comparar los coeficientes de determinación (R^2) reportados en la tabla N° 6, el modelo de Freundlich presenta un valor más cercano a la unidad (0.9256), en contraste con el modelo de Langmuir (0.8612). De esta forma, el modelo que más se ajusta a los resultados obtenidos es el de Freundlich, por lo que la superficie los cladodios secos de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose se asume es heterogénea, y la adsorción se lleva de mejor forma tanto interactuando las moléculas de cromo (VI) y los sitios activos de la biomasa, como las moléculas de cromo (VI) entre sí formando una monocapa.

Tabla N° 6. Constantes de las Isoterma de Langmuir y Freundlich para la adsorción de cromo (VI) con cladodios secos de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose (creación propia)

Isoterma de Langmuir				Isoterma de Freundlich		
T_r (mg/g)	Q_L (L/mg)	R^2	R_L	Q_F (mg/g)	$1/n$	R^2
0.104	8.007	0.8612	0.573 – 0.112	0.192	0.661	0.9256

Debido a que el valor de $1/n$ oscila entre 0 y 1 (0.661), la biomasa es eficiente para adsorber cromo (VI) ⁽³⁴⁾. Así mismo, aunque los resultados no se ajustan al modelo de Langmuir, al calcular la constante de afinidad (R_L) los valores oscilaron entre 0.573 a 0.112 para las concentraciones iniciales de Cr (VI) de 0.093 a 0.987

mg/L respectivamente, indicando que también la adsorción es favorable. Por ello se establece que se lleva a cabo una adsorción en monocapa, donde la cantidad adsorbida aumenta hasta alcanzar un valor límite correspondiente al recubrimiento de la superficie, característica de un proceso únicamente de quimisorción (ver figura N° 12), en el cual las moléculas de cromo se mantienen unidas a la superficie de la *Opuntia* formando un enlace químico fuerte. (35)

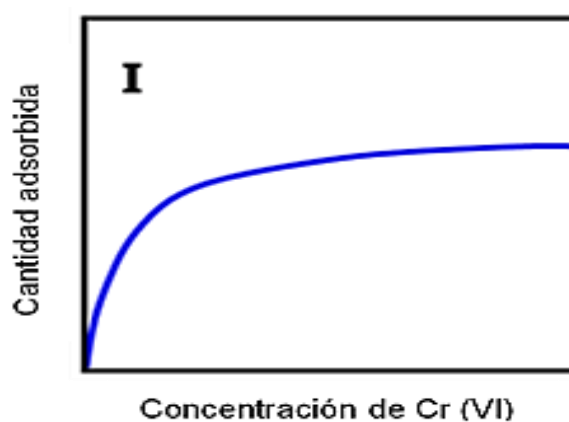


Figura N° 12. Gráfica de Isotherma de Adsorción Tipo I (35)

Otros estudios han probado diferentes biomásas para remover contaminantes, determinando las constantes de Langmuir y Freundlich para establecer la capacidad de adsorción. Como se puede observar en la tabla N° 7, aunque muchas veces es utilizada la misma biomasa, la adsorción se comporta de diferente forma según el contaminante que se está removiendo. Tal es el caso de la *Opuntia ficus indica*, donde para plomo y cadmio se ajusta al modelo de Langmuir, mientras que para cromo (VI) al de Freundlich. Esto significa, que el modelo con el cual se basa la adsorción de un contaminante, dependerá tanto de éste como de la naturaleza de la biomasa y de los factores que influyen en la adsorción.

Tabla N° 7. Constantes de las Isotermas de Langmuir y Freundlich para diferentes biomasas y contaminantes (creación propia)

Biomasa	Contaminante	Isoterma de Langmuir			Isoterma de Freundlich		
		T_r (mg/g)	Q_L (L/mg)	R^2	Q_F (mg/g)	1/n	R^2
Cladodios de <i>Opuntia ficus indica</i> ⁽⁵⁾	Cr (VI)	-----	-----	-----	2.5400	0.7744	-----
Cladodios de <i>Opuntia ficus indica</i> ⁽⁶⁾	Pb (II)	158.73	0.15	0.9972	-----	-----	-----
	Cd (II)	30.42	0.011	0.991	-----	-----	-----
Cáscara de yuca ⁽⁷⁾	Azul de metileno	-----	-----	-----	2.832	0.719	0.963
Carbón activado de estopa de coco ⁽¹⁴⁾	Co (II)	58.82	0.1735	0.973	-----	-----	-----
	Ni (II)	-----	-----	-----	15.86	0.572	0.903

CAPITULO VI

6.0 CONCLUSIONES

1. Los cladodios secos de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose poseen grupos funcionales característicos (carboxílicos principalmente) que pueden ser capaces de adsorber componentes catiónicos como el cromo (VI) por medio de quimisorción.
2. La bioadsorción de cromo (VI) teóricamente se lleva a cabo de mejor forma a pH superiores a 6.3, donde la superficie de los cladodios secos de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose se cargan negativamente y logran una mayor remoción de compuestos catiónicos.
3. Aunque todas las dosis de cladodios secos de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose son capaces de remover cromo (VI), a una concentración de 10 mg de *Opuntia* por cada mL de solución acuosa se logra la mejor bioadsorción.
4. La adsorción de cromo (VI) con cladodios secos de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose se lleva a cabo rápidamente, alcanzando arriba del 50% de remoción en 5 minutos, pero se logra una mejor bioadsorción a un tiempo de contacto de 30 minutos.
5. Los cladodios secos de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose se ajustan al modelo de la Isoterma de Freundlich, presentando una superficie heterogénea lo que permite que la adsorción del cromo (VI) sea favorable en una monocapa de tipo I.

CAPITULO VII

7.0 RECOMENDACIONES

1. Para expertos en el análisis orgánico, realizar un espectro de infrarrojo cercano (FT-NIR), para tener un mejor panorama de los picos característicos, ya que esta región permite identificar mejor la celulosa, uno de los principales componentes de la *Opuntia*.
2. Para investigaciones asociadas, realizar un estudio comparativo de la influencia del pH antes y después del pHPC (6.3) en la remoción de cromo (VI) con cladodios secos de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose.
3. Para el siguiente trabajo de continuidad con el tema, probar dosis entre 0.5 y 1.0 %p/v de cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose para establecer la menor cantidad de biomasa donde se alcance una buena remoción de Cr (VI) y así disminuir recursos.
4. Para el siguiente trabajo de continuidad con el tema, probar tiempos de contacto entre 15 y 30 minutos de los cladodios secos de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose y soluciones de Cr (VI) para establecer el menor tiempo de mayor adsorción y optimizar los recursos.
5. Para los estudiantes de la carrera en Lic. Química y Farmacia y carreras afines, se recomienda evaluar la capacidad de adsorción de los cladodios secos de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose con diferentes tipos de agua (potable, embotellada, superficial, residuales, etc.) para la remoción de cromo (VI).
6. A los usuarios, se les recomienda sembrar plantas de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose en zonas contaminadas con cromo (VI), para evaluar la capacidad de remoción que posee bajo condiciones reales.

7. Para futuros trabajos de Investigación, evaluar la capacidad de remoción de los cladodios secos de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose con otros metales contaminantes del medio ambiente y dañinos a la salud de las personas como el plomo, mercurio, cadmio, arsénico, níquel, cobalto, etc.

BIBLIOGRAFIA

1. Fuentes-Pérez M, Terrazas T, Arias S. Anatomía floral de cinco especies de *Opuntia* (Opuntioideae, Cactaceae) de México. *Polibotánica*. 2009(27):89-102.
2. Pineda OP, Oyuela OW. Sinopsis del género *Opuntia* Mill. (Opuntioideae, Cactaceae) en Honduras. *Revista Forestal del Perú*. 2020;35(1):54-72.
3. Scheinvar L, Olalde-Parra G, Gallegos-Vázquez C. Una nueva especie del género *Opuntia* (Cactaceae) para el estado de Veracruz, México. *Botanical Sciences*. 2015;93(1):33-9.
4. Moreno Álvarez M, García Pantaleón D, Belén Camacho D, Medina Martínez C, Muñoz Ojeda N. Análisis bromatológico de la tuna *Opuntia elatior* Miller (Cactaceae). *Revista de la Facultad de Agronomía*. 2008;25(1):68-80.
5. Aruwa CE, Amoo SO, Kudanga T. *Opuntia* (Cactaceae) plant compounds, biological activities and prospects—A comprehensive review. *Food Research International*. 2018;112:328-44.
6. López JGC, Menjívar J. Diversidad de cactus de El Salvador 2015.
7. Crespín, Raquel; Elias, Diana. Evaluación del uso de cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose como sustrato bioadsorbente para la remoción de cromo (VI) en disolución acuosa. Universidad de El Salvador; 2020.
8. Mora Burgos MA, Bojacá Méndez IM. Revisión bibliográfica de estudios realizados en Colombia y Latinoamérica, relacionados con la adsorción de cromo hexavalente y mercurio en disoluciones acuosas y muestras reales, empleando adsorbentes naturales e isothermas de adsorción.
9. Meza CL, Sun Kou R, Castro Arroyo T. Biosorción del colorante azul de metileno usando los cladodios de la tuna (*Opuntia ficus indica*). *Revista de la Sociedad Química del Perú*. 2020;86(3):231-45.
10. Mateo SG. Análisis cuantitativo por espectrometría infrarroja empleando la transformada de Fourier: Universitat de Valencia (Spain); 1993.

11. Villanueva Carrillo A. " Estudio de la Remoción de Cromo Hexavalente Presente en Solución Acuosa Empleando la Biomasa de la Musa Paradisiaca como Biosorbente". 2017.
12. Roig Marino B. Evaluación de las tecnologías de tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con Cromo. 2006.
13. Chávez Porras Á. Descripción de la nocividad del cromo proveniente de la industria curtiembre y de las posibles formas de removerlo. Revista Ingenierías Universidad de Medellín. 2010;9(17):41-9.
14. Rubio DIC, Calderón RAM, Gualtero AP, Acosta DR, Sandoval J. Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Una revisión. Ingeniería y región. 2015(13):73-90.
15. Castillo F. Biotecnología ambiental: Editorial Tébar, S. L.; 2005.
16. Figueroa D, Moreno A, Hormaza A. Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz. Revista Ingenierías Universidad de Medellín. 2015;14(26):105-20.
17. Inga Manchola PA. Estudio isotérmico de biosorción de cadmio, cromo, plomo y zinc en solución acuosa empleando el pinzote (ranqui) de plátano (Musa paradisiaca L.) 2012.
18. Martín-Martínez JM. Adsorción física de gases y vapores por carbones: Universidad de Alicante. Secretariado de Publicaciones; 1990.
19. Penedo Medina M, Manals Cutiño EM, Vendrell Calzadilla F, Salas Tort D. Adsorción de níquel y cobalto sobre carbón activado de cascarón de coco. Tecnología Química. 2015;35(1):110-24.
20. Bakatula EN, Richard D, Neculita CM, Zagury GJ. Determination of point of zero charge of natural organic materials. Environmental Science and Pollution Research. 2018;25(8):7823-33.

21. Villa FAA. Determinación del punto de carga cero y punto isoelectrico de dos residuos agrícolas y su aplicación en la remoción de colorantes. RIAA. 2013;4(2):27-36.
22. Albis-Arrieta A, Llanos-Reales H, Galeano-Gil J, García-Moreno D. Adsorción de azul de metileno utilizando cáscara de yuca (*Manihot esculenta*) modificada químicamente con ácido oxálico. Revista Ion. 2018;31(2):99-110.
23. Sierra CAS, García HG. Verificación analítica para las determinaciones de cromo hexavalente en aguas por espectrofotometría. Ingenierías USBMed. 2013;4(1):22-6.
24. Campos-Medina E. Estudio de la adsorción de cromo hexavalente utilizando como biomaterial la Ectodermis de Opuntia. Quivera Revista de Estudios Territoriales. 2008;10(1):16-31.
25. Alca JJH. Evaluar los parámetros durante el tratamiento térmico para obtención de mucílago de la penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*) [Internet]. [PUNO-PERU]: Universidad Nacional del Altiplano; 2017 [citado julio de 2022]. Disponible en:http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/10347/Huanca_Alca_Juan_Jos%C3%A9.pdf?sequence=1&isAllowed=y
26. Limachi RMC. Extracción y caracterización de la fibra de tuna (*Opuntia ficus-indica*). [la paz-bolivia]: universidad mayor de san andrés facultad de ciencias puras y naturales carrera de ciencias químicas; 2020.
27. Barka N, Abdennouri M, El Makhfouk M, Qourzal S. Biosorption characteristics of cadmium and lead onto eco-friendly dried cactus (*Opuntia ficus indica*) cladodes. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2013;1(3):144-9.
28. Iqbal M, Saeed A, Zafar SI. FTIR spectrophotometry, kinetics and adsorption isotherms modeling, ion exchange, and EDX analysis for understanding the mechanism of Cd²⁺ and Pb²⁺ removal by mango peel waste. Journal of hazardous materials. 2009;164(1):161-71.

29. Nasiruddin Khan M, Sarwar A. Determination of points of zero charge of natural and treated adsorbents. *Surface Review and Letters*. 2007;14(03):461-9.
30. Morosanu I, Teodosiu C, Paduraru C, Ibanescu D, Tofan L. Biosorption of lead ions from aqueous effluents by rapeseed biomass. *New biotechnology*. 2017;39:110-24.
31. Fallas J. Correlación lineal: midiendo la relación entre dos variables: Universidad para la Cooperación Internacional; 2012 [cited 2022 /09/08]. Available from: https://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad_2/complementarias/correlacion_lineal_2012.pdf.
32. Huanca Luque M. Validación de un método analítico para la determinación de cromo hexavalente por espectrofotometría en aguas residuales provenientes de curtiembres, Arequipa-2018. 2019.
33. Naiya TK, Singha B, Das SK. FTIR study for the Cr (VI) removal from aqueous solution using rice waste. *Int Proc Chem Biol Environ Eng*. 2011;10:114-9.
34. Penedo Medina M, Manals Cutiño EM, Vendrell Calzadilla F, Salas Tort D. Adsorción de níquel y cobalto sobre carbón activado de cascarón de coco. *Tecnología Química*. 2015;35(1):110-24.
35. P.W. Atkins "Química Física", tema 28. Ediciones Omega, 6a edición.

ANEXOS

Anexo N° 1
Constancia de identificación de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose. (7)



MINISTERIO
DE CULTURA

Ingeniero Sergio Armando Maravilla
Jefe Químico y Profesor Universitario III
Presente

Por este medio hago constar que la muestra recolectada en la Calle Castro Morán, Colonia Santa Matilde, Municipio de Mejicanos, Departamento San Salvador, en fecha 23 de mayo de 2019, por Sergio Armando Maravilla, Diana Elias, Raquel Crespín, con características Arbusto de 1 Mt. Flores amarillas. Con dicha información y al examinar la muestra se determina que pertenece a la especie *Opuntia guatemalensis Britton & Rose* de la familia Cactaceae, la cuál será depositada en la colección nacional del herbario MHES del Museo de Historia Natural de El Salvador, bajo el número de Voucher J. Menjivar. *et al* 5143.

Para los usos que estime conveniente se extiende la presente constancia de identificación de muestra botánica a los 14 días de octubre del año 2019.

F. Ljda. Jenny Menjivar
Curadora Herbario MHES

Coordinadora Colecciones de Historia Natural MUHNES



Anexo Nº 2

Fotografías de procedimientos realizados en el laboratorio (creación propia)

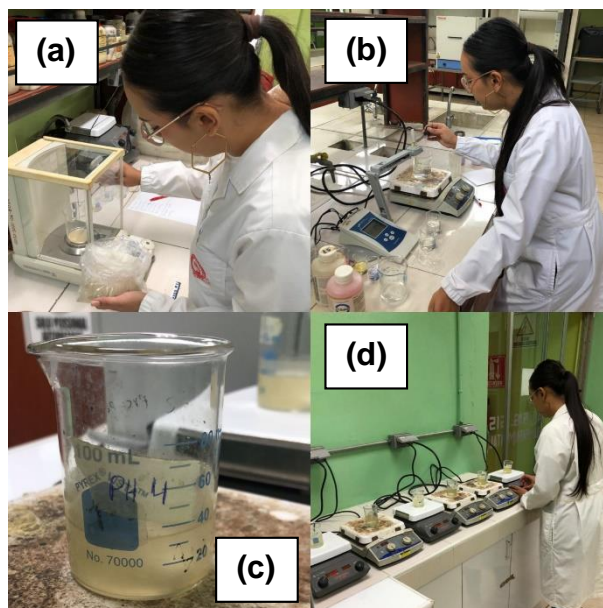


Figura Nº 13. (a) pesaje de cladodios secos de Opuntia, (b) preparación de soluciones a diferentes pH, (c) soluciones a diferentes pH más Opuntia, (d) agitación por 48 horas

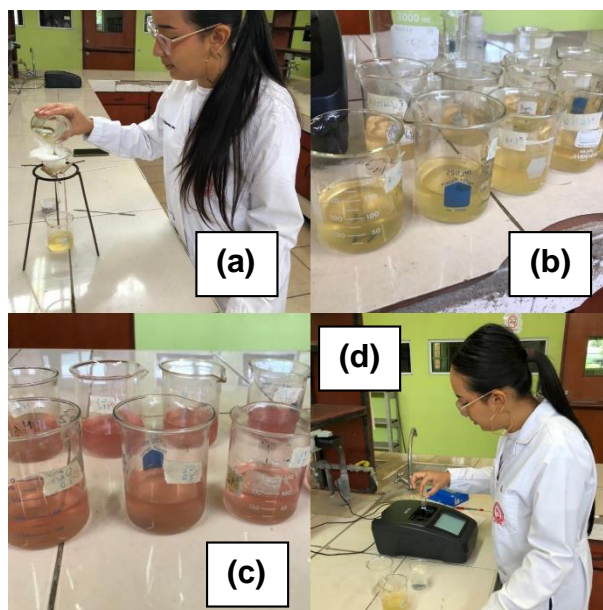
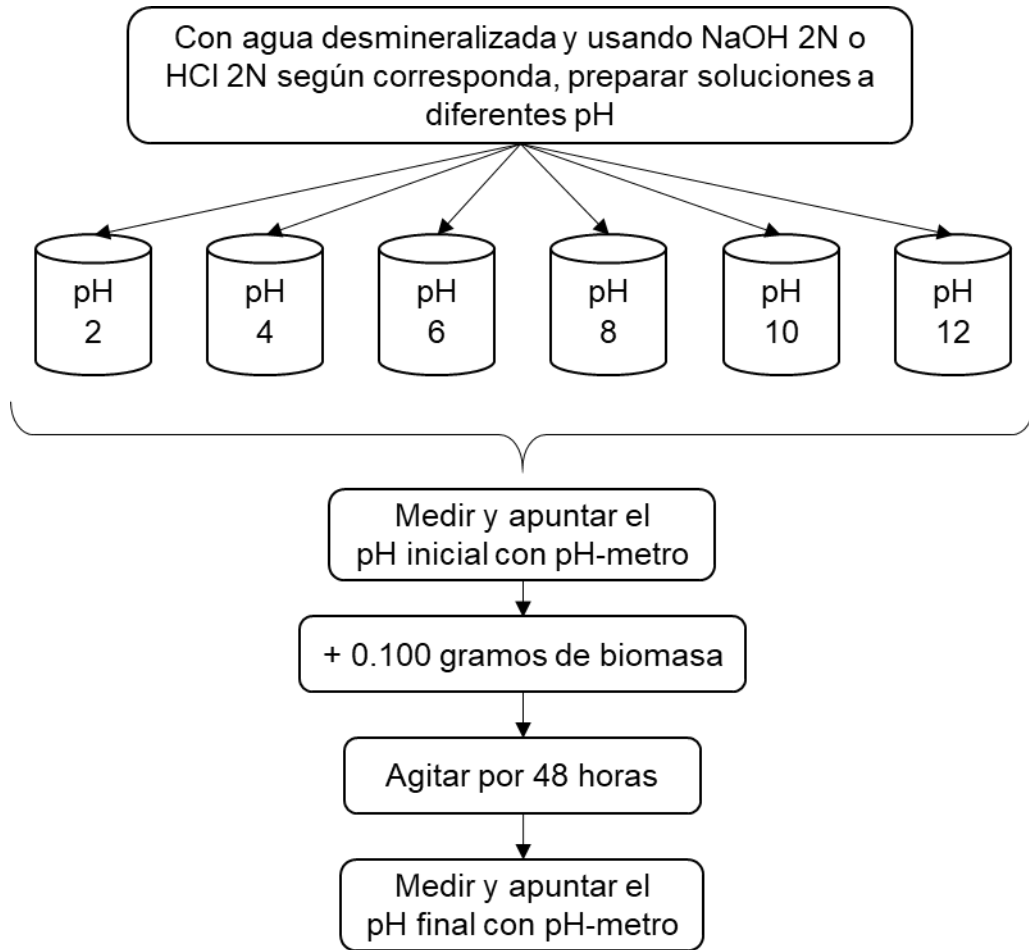


Figura Nº 14. (a) filtración de soluciones de Cr(VI) con Opuntia, (b) soluciones de Cr(VI) y Opuntia sin DFC, (c) soluciones de Cr(VI) y Opuntia con DFC, (d) lecturas en espectrofotómetro UV/Vis

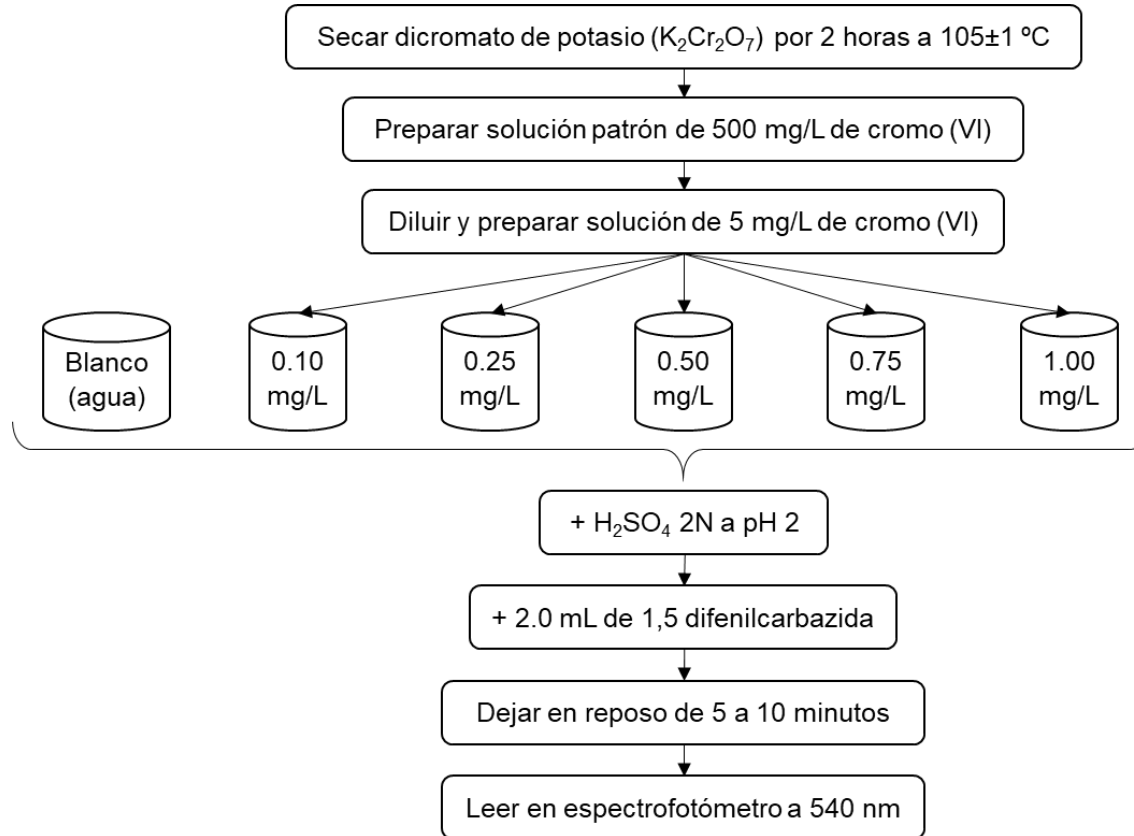
Anexo N° 3

Esquema de trabajo para definir el pH en el Punto de Carga Cero (pHPCC) de los cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose (creación propia)



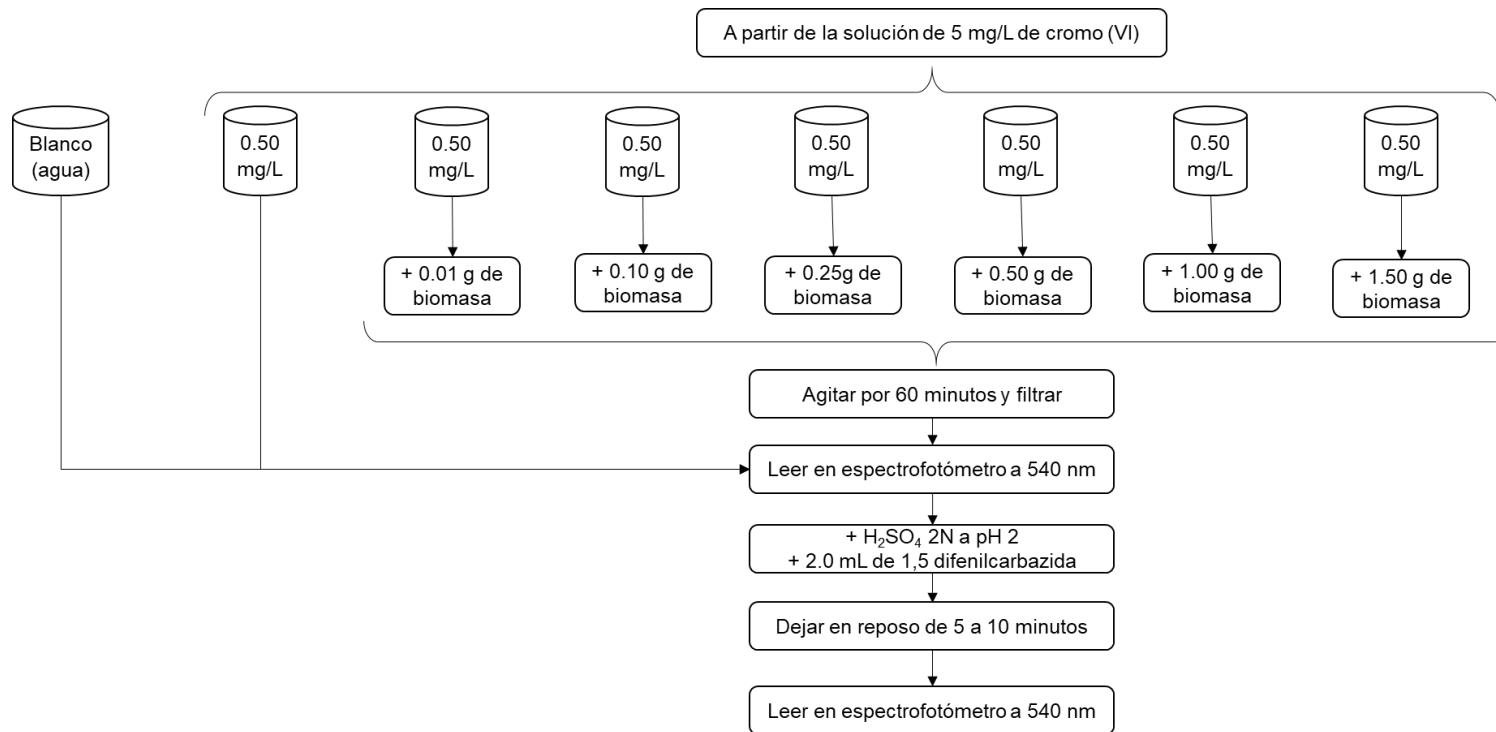
Anexo Nº 4

Esquema de trabajo para elaborar la curva de calibración para la cuantificación de Cr (VI) (creación propia)



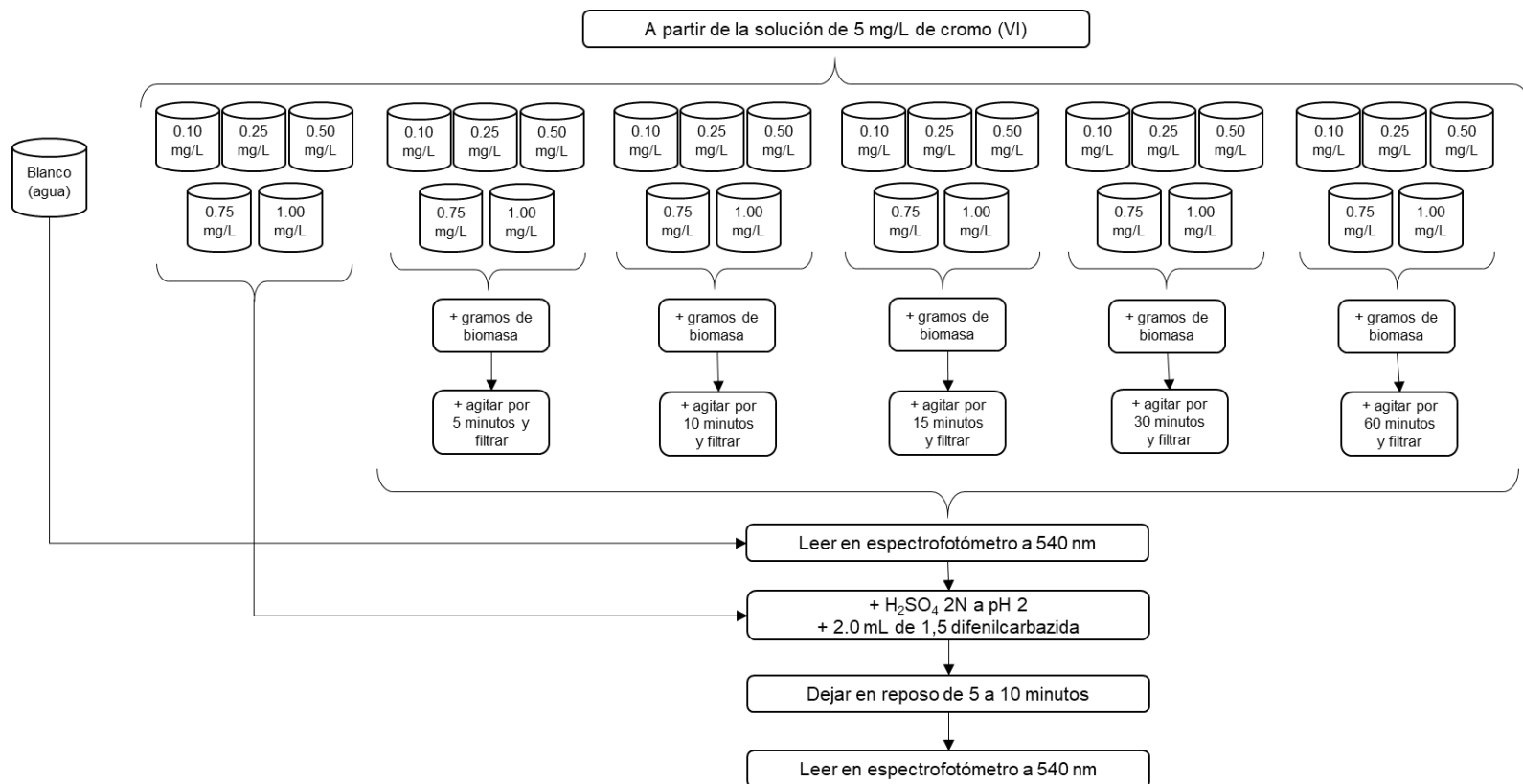
Anexo Nº 5

Esquema de trabajo para establecer la influencia de la concentración de la biomasa de cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose en la remoción de Cr (VI) (creación propia)



Anexo N° 6

Esquema de trabajo para estimar el tiempo de equilibrio para alcanzar la máxima remoción de Cr (VI) usando los cladodios de *Opuntia guatemalensis* Britton & Rose (creación propia)



Anexo N° 7
Resumen de resultados de pH para el cálculo del PHPCC (creación propia)

pH teórico	pH inicial 1	pH inicial 2	pH inicial 3	Promedio pH inicial	pH final 1	pH final 2	pH final 3	Promedio pH final	ΔpH
2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.46	2.26	2.39	2.37	0.37
4.00	4.06	4.06	4.06	4.06	5.84	6.11	6.06	6.00	1.94
6.00	6.07	6.07	6.07	6.07	6.31	6.30	6.32	6.31	0.24
8.00	7.97	7.97	7.97	7.97	6.78	6.80	6.77	6.78	-1.19
10.00	9.99	9.99	9.99	9.99	9.51	9.59	9.65	9.58	-0.41
12.00	11.99	11.99	11.99	11.99	11.70	11.74	11.74	11.73	-0.26

Anexo N° 8
Absorbancias del estándar para la elaboración de la curva de calibración
de Cr (VI) (creación propia)

ppm_{Cr (VI)}	Abs 1	Abs 2	Abs 3	Abs promedio
0.10	0.075	0.071	0.072	0.073
0.25	0.202	0.199	0.197	0.199
0.50	0.394	0.397	0.402	0.398
0.75	0.596	0.591	0.601	0.596
1.00	0.792	0.791	0.794	0.792

Anexo Nº 9

Resultados de la influencia de la concentración de biomasa en la remoción de Cr (VI) (creación propia)

Repetición	Concentración por cada 100.0 mL	0.00 g	0.01 g	0.10 g	0.25 g	0.50 g	1.00 g	1.50 g
1	Peso real (g)	0.0000	0.0117	0.1016	0.2508	0.5013	1.0002	1.5006
	Abs – DFC	0.000	0.000	0.014	0.045	0.090	0.117	0.317
	Abs + DFC	0.000	0.351	0.281	0.243	0.245	0.160	0.335
	Abs final	0.405	0.351	0.267	0.198	0.155	0.043	0.018
	ppm _{Cr(IV)}	0.512	0.444	0.339	0.252	0.198	0.058	0.026
	%R	0.0	13.2	33.8	50.7	61.3	88.7	94.8
2	Peso real (g)	0.0000	0.0118	0.1009	0.2515	0.5008	1.0006	1.5026
	Abs – DFC	0.000	0.000	0.018	0.056	0.098	0.160	0.306
	Abs + DFC	0.000	0.371	0.281	0.263	0.247	0.197	0.334
	Abs final	0.405	0.371	0.263	0.207	0.149	0.037	0.028
	ppm _{Cr(IV)}	0.512	0.469	0.334	0.263	0.191	0.050	0.039
	%R	0.0	8.3	34.8	48.5	62.7	90.2	92.4
3	Peso real (g)	0.0000	0.0110	0.1002	0.2501	0.5009	1.0001	1.5002
	Abs – DFC	0.000	0.002	0.010	0.091	0.100	0.199	0.401
	Abs + DFC	0.000	0.367	0.304	0.305	0.238	0.225	0.422
	Abs final	0.405	0.365	0.294	0.214	0.138	0.026	0.021
	ppm _{Cr(IV)}	0.512	0.462	0.372	0.272	0.177	0.036	0.030
	%R	0.0	9.8	27.2	46.8	65.4	92.9	94.1
Promedio	Peso real (g)	0.0000	0.0115	0.1009	0.2508	0.5010	1.0003	1.5011
	%R	0.0	10.5	31.9	48.7	63.1	90.6	93.8
<p>Concentración inicial teórica= 0.50 ppm Cr (VI) Absorbancia= 0.405 Concentración inicial real= 0.512 ppm Cr (VI)</p>								

Anexo N° 10

Resultados del tiempo de equilibrio para alcanzar la máxima remoción de Cr (VI) a un tiempo de contacto cero minutos (creación propia)

ppm_{Cr(VI)} teórica	Absorbancia	ppm_{Cr(VI)} real
0.10	0.071	0.093
0.25	0.190	0.242
0.50	0.391	0.494
0.75	0.596	0.751
1.00	0.784	0.987

Anexo N° 11

Resultados del tiempo de equilibrio para alcanzar la máxima remoción de Cr (VI) para un tiempo de contacto de 5 minutos (creación propia)

Repetición	ppm _{Cr(VI)} teórica	Peso real (g)	Abs – DFC	Abs + DFC	Abs final	ppm _{Cr(VI)} real	%R
1	0.10	1.0010	0.123	0.155	0.032	0.044	52.6
	0.25	1.0071	0.146	0.237	0.091	0.118	51.3
	0.50	1.0018	0.191	0.339	0.148	0.189	61.7
	0.75	1.0017	0.197	0.467	0.270	0.342	54.4
	1.00	1.0012	0.143	0.473	0.330	0.418	57.7
2	0.10	1.0053	0.15	0.181	0.031	0.043	54.0
	0.25	1.0008	0.207	0.293	0.086	0.112	53.9
	0.50	1.0025	0.19	0.328	0.138	0.177	64.2
	0.75	1.0057	0.121	0.391	0.27	0.342	54.4
	1.00	1.0007	0.148	0.463	0.315	0.399	59.6
3	0.10	1.0044	0.147	0.176	0.029	0.040	56.7
	0.25	1.0026	0.17	0.255	0.085	0.110	54.4
	0.50	1.0068	0.221	0.375	0.154	0.197	60.1
	0.75	1.0003	0.145	0.428	0.283	0.359	52.2
	1.00	1.0057	0.158	0.492	0.334	0.423	57.2
Promedio	0.10	1.0036	N/A	N/A	N/A	0.042	54.4
	0.25	1.0035	N/A	N/A	N/A	0.113	53.2
	0.50	1.0037	N/A	N/A	N/A	0.188	62.0
	0.75	1.0026	N/A	N/A	N/A	0.348	53.7
	1.00	1.0025	N/A	N/A	N/A	0.413	58.1

Anexo N° 12

Resultados del tiempo de equilibrio para alcanzar la máxima remoción de Cr (VI) para un tiempo de contacto de 10 minutos (creación propia)

Repetición	ppm _{Cr(VI)} teórica	Peso real (g)	Abs – DFC	Abs + DFC	Abs final	ppm _{Cr(VI)} real	%R
1	0.10	1.0043	0.253	0.273	0.020	0.029	68.8
	0.25	1.0007	0.196	0.273	0.077	0.100	58.5
	0.50	1.0022	0.227	0.356	0.129	0.166	66.5
	0.75	1.0025	0.223	0.461	0.238	0.302	59.8
	1.00	1.0030	0.195	0.465	0.270	0.342	65.3
2	0.10	1.0002	0.214	0.236	0.022	0.031	66.1
	0.25	1.0004	0.179	0.253	0.074	0.097	60.1
	0.50	1.0031	0.283	0.403	0.12	0.154	68.8
	0.75	1.0042	0.271	0.481	0.21	0.267	64.4
	1.00	1.0028	0.25	0.534	0.284	0.360	63.5
3	0.10	1.0009	0.22	0.239	0.019	0.028	70.2
	0.25	1.0037	0.251	0.321	0.07	0.092	62.1
	0.50	1.0005	0.175	0.293	0.118	0.152	69.3
	0.75	1.0041	0.278	0.491	0.213	0.271	63.9
	1.00	1.0049	0.189	0.447	0.258	0.327	66.8
Promedio	0.10	1.0018	N/A	N/A	N/A	0.029	68.4
	0.25	1.0016	N/A	N/A	N/A	0.096	60.2
	0.50	1.0019	N/A	N/A	N/A	0.157	68.2
	0.75	1.0036	N/A	N/A	N/A	0.280	62.7
	1.00	1.0036	N/A	N/A	N/A	0.343	65.2

Anexo N° 13

Resultados del tiempo de equilibrio para alcanzar la máxima remoción de Cr (VI) para un tiempo de contacto de 15 minutos (creación propia)

Repetición	ppm _{Cr(VI)} teórica	Peso real (g)	Abs – DFC	Abs + DFC	Abs final	ppm _{Cr(VI)} real	%R
1	0.10	1.0022	0.192	0.205	0.013	0.020	78.3
	0.25	1.0005	0.175	0.235	0.060	0.079	67.3
	0.50	1.0010	0.079	0.164	0.085	0.110	77.6
	0.75	1.0006	0.158	0.36	0.202	0.257	65.8
	1.00	1.0005	0.192	0.447	0.255	0.324	67.2
2	0.10	1.0006	0.205	0.216	0.011	0.018	81.0
	0.25	1.0006	0.131	0.18	0.049	0.065	73.0
	0.50	1.0009	0.102	0.199	0.097	0.126	74.6
	0.75	1.0001	0.133	0.314	0.181	0.231	69.3
	1.00	1.0006	0.25	0.492	0.242	0.307	68.9
3	0.10	1.0023	0.187	0.201	0.014	0.021	76.9
	0.25	1.0001	0.147	0.197	0.05	0.067	72.5
	0.50	1.0009	0.136	0.242	0.106	0.137	72.3
	0.75	1.0001	0.103	0.296	0.193	0.246	67.3
	1.00	1.0085	0.217	0.452	0.235	0.299	69.7
Promedio	0.10	1.0017	N/A	N/A	N/A	0.020	78.7
	0.25	1.0004	N/A	N/A	N/A	0.070	70.9
	0.50	1.0009	N/A	N/A	N/A	0.124	74.9
	0.75	1.0003	N/A	N/A	N/A	0.245	67.4
	1.00	1.0032	N/A	N/A	N/A	0.310	68.6

Anexo N° 14

Resultados del tiempo de equilibrio para alcanzar la máxima remoción de Cr (VI) para un tiempo de contacto de 30 minutos (creación propia)

Repetición	ppm _{Cr(VI)} teórica	Peso real (g)	Abs – DFC	Abs + DFC	Abs final	ppm _{Cr(VI)} real	%R
1	0.10	1.0010	0.14	0.147	0.007	0.013	86.4
	0.25	1.0003	0.162	0.178	0.016	0.024	90.1
	0.50	1.0007	0.159	0.228	0.069	0.090	81.7
	0.75	1.0005	0.217	0.356	0.139	0.178	76.3
	1.00	1.0051	0.243	0.43	0.187	0.238	75.8
2	0.10	1.0001	0.124	0.129	0.005	0.010	89.1
	0.25	1.0008	0.201	0.212	0.011	0.018	92.7
	0.50	1.0003	0.132	0.195	0.063	0.083	83.2
	0.75	1.0010	0.193	0.347	0.154	0.197	73.8
	1.00	1.0024	0.279	0.462	0.183	0.233	76.4
3	0.10	1.0010	0.135	0.144	0.009	0.015	83.7
	0.25	1.0039	0.165	0.182	0.017	0.025	89.6
	0.50	1.0005	0.148	0.215	0.067	0.088	82.2
	0.75	1.0002	0.151	0.317	0.166	0.212	71.8
	1.00	1.0002	0.303	0.468	0.165	0.211	78.6
Promedio	0.10	1.0007	N/A	N/A	N/A	0.013	86.4
	0.25	1.0017	N/A	N/A	N/A	0.022	90.8
	0.50	1.0005	N/A	N/A	N/A	0.087	82.4
	0.75	1.0006	N/A	N/A	N/A	0.196	73.9
	1.00	1.0026	N/A	N/A	N/A	0.227	76.9

Anexo N° 15
Resultados del tiempo de equilibrio para alcanzar la máxima remoción de Cr (VI) para un tiempo de contacto de 60 minutos (creación propia)

Repetición	ppm _{Cr(VI)} teórica	Peso real (g)	Abs – DFC	Abs + DFC	Abs final	ppm _{Cr(VI)} real	%R
1	0.10	1.0010	0.146	0.148	0.002	0.006	93.1
	0.25	1.0007	0.168	0.174	0.006	0.011	95.3
	0.50	1.0006	0.287	0.335	0.048	0.064	87.0
	0.75	1.0009	0.335	0.449	0.114	0.147	80.5
	1.00	1.0010	0.197	0.337	0.140	0.179	81.8
2	0.10	1.0010	0.136	0.14	0.004	0.009	90.4
	0.25	1.0029	0.175	0.178	0.003	0.008	96.8
	0.50	1.0007	0.259	0.311	0.052	0.069	86.0
	0.75	1.0008	0.232	0.353	0.121	0.156	79.3
	1.00	1.0005	0.189	0.344	0.155	0.198	79.9
3	0.10	1.0008	0.164	0.169	0.005	0.010	89.1
	0.25	1.0009	0.124	0.134	0.01	0.016	93.2
	0.50	1.0009	0.206	0.265	0.059	0.078	84.2
	0.75	1.0006	0.398	0.511	0.113	0.146	80.6
	1.00	1.0016	0.168	0.318	0.15	0.192	80.5
Promedio	0.10	1.0009	N/A	N/A	N/A	0.008	90.9
	0.25	1.0015	N/A	N/A	N/A	0.012	95.1
	0.50	1.0007	N/A	N/A	N/A	0.070	85.8
	0.75	1.0008	N/A	N/A	N/A	0.149	80.1
	1.00	1.0010	N/A	N/A	N/A	0.190	80.8

Anexo N° 16

Resultados para el cálculo de las constantes de Langmuir y Freundlich (creación propia)

Peso biomasa (g)	ppm_{Cr(VI)} inicial	C_f (mg/L)	q_e	C_f/q_e	R_L	log C_f	log q_e
1.0007	0.093	0.013	0.0080	1.5792	0.57	-1.897	-2.096
1.0017	0.242	0.022	0.0219	1.0150	0.34	-1.652	-1.659
1.0005	0.494	0.087	0.0407	2.1397	0.20	-1.060	-1.391
1.0006	0.751	0.196	0.0555	3.5257	0.14	-0.708	-1.256
1.0026	0.987	0.227	0.0757	3.0033	0.11	-0.643	-1.121

Todos los experimentos se llevaron a cabo con un volumen de 100 mL (0.10L)

