



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS**

**EVALUACIÓN DE LA EFICACIA DE LA *Heliconia psittacorum*  
(heliconiaceae) CULTIVADA HIDROPÓNICAMENTE PARA LA  
FITORREMEDIACIÓN DE AGUAS CON PRESENCIA DE CROMO  
(VI)**

**TIPO:** PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN

Trabajo de titulación presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL**

**AUTORA:** JENNIFER ALEXANDRA OREJUELA ROMERO

**TUTOR:** ING. JUAN CARLOS GONZÁLEZ GARCÍA

Riobamba-Ecuador

2017

**©2017, Jennifer Alexandra Orejuela Romero**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

**ESUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS**

El tribunal certifica que: El trabajo de titulación “EVALUACIÓN DE LA EFICACIA DE LA *Heliconia psittacorum* (heliconiaceae) CULTIVADA HIDROPÓNICAMENTE PARA LA FITORREMEDIACIÓN DE AGUAS CON PRESENCIA DE CROMO (VI)” de responsabilidad de la señorita Jennifer Alexandra Orejuela Romero, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, quedando autorizado su presentación.

ING. JUAN GONZÁLEZ GARCÍA

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

\_\_\_\_\_

ING. ANDRÉS BELTRAN

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

\_\_\_\_\_

Yo Jennifer Alexandra Orejuela Romero, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autora, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Riobamba, 14 de julio del 2017

Jennifer Alexandra Orejuela Romero

C.I. 220007886-9

Soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este Proyecto de Titulación y el patrimonio intelectual del Proyecto de titulación, pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Jennifer Alexandra Orejuela Romero

## DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a Dios, el ser supremo que me ha dado todo y por quien soy hoy y cuanto gozo en tener es gracias a él. Te amo Señor mío

A mi madre, mi cielo en la tierra, el pilar más importante en mi vida, mi guía, mi mejor amiga, el amor perfecto, mi todo. Te amo y hoy puedo decir lo logramos juntas, es por ti y para ti. Siempre he estado en tus oraciones y solo Dios sabe cuánto agradezco que seas mi ángel guardián, mi madrecita querida.

A mi padre, quien con su carácter firme y buenos consejos supo guiarme por el camino correcto, por ser ese hombre celoso y desconfiado que siempre ha cuidado de su pequeña, por siempre estar pendiente de mí, por darme tu amor y hoy ser un hombre mejor que ayer, esto es por ti y para ti papito querido. Te amo.

A mis hermanas Malena y Vanessa son ustedes mi inspiración, el mejor ejemplo de lucha y superación, siempre he podido contar con ustedes y en cada momento de mi vida han estado con una palabra de aliento y amor. Las amo.

A mis tres amores Aaron, Caleb y Asha, mis ñañitos hermosos nunca se rindan las mejores oportunidades están al pie de una buena decisión. Los amo.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por cada una de las bendiciones que ha puesto en mi vida, por lo que tengo y por lo que no, puesto que él sabe lo que me conviene.

A mi madre y mi padre sin ellos no podría haberse cristalizado este logro tan importante en mi vida.

A mis hermanas que siempre me brindaron su apoyo en cada decisión, y patrocinaron junto a mis padres esta investigación.

A ti mi amor bonito, Migue siempre tuviste las palabras de aliento que no me dejaron rendir en las dificultades, un abrazo para reconfortarme y un beso en la frente para mostrarme cuanto te importo.

Al Ing. Juan Carlos González por ser un excelente mentor que siempre estuvo predispuesto a escuchar mis inquietudes y suplirlas con buenos consejos.

Al Ing. Andrés Beltrán por sus recomendaciones en la fase estructural e investigativa del proyecto.

Al Ing. Víctor Lindao que siempre mostro un gran apoyo y colaboración en esta investigación.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xv
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	xvi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvii
SIMBOLOS Y ABREVIATURAS .....	xix
RESUMEN .....	xx
SUMMARY .....	xxi
CAPÍTULO I	
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Identificación del problema .....	3
1.2. Justificación de la investigación .....	4
1.3. Objetivos .....	6
1.3.1. Objetivo General .....	6
1.3.2. Objetivos Específicos .....	6
CAPÍTULO II	
2. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL .....	7
2.1. Antecedentes de la investigación.....	7
2.2. Bases Teóricas.....	9
2.2.1. Metales pesados.....	9
2.2.2. Cromo .....	11
2.2.2.1. Generalidades .....	11
2.2.2.2. Propiedades Físicoquímicas del Cromo.....	12
2.2.2.3. Usos industriales del cromo.....	13
2.2.2.4. Cromo en el ambiente y sus efectos.....	15



2.2.3.	Absorción y transporte del cromo en las plantas .....	18
2.2.3.1.	Fitotoxicidad .....	19
2.2.3.2.	Resistencia.....	20
2.2.3.3.	Factor de Bioconcentración .....	22
2.2.4.	Fitorremediación .....	22
2.2.4.1.	Ventajas y desventajas de la fitorremediación .....	24
2.2.4.2.	Estrategias de la fitorremediación.....	25
2.2.4.3.	Rizofiltración.....	26
2.2.5.	Hidroponía.....	27
2.2.5.1.	Sistemas hidropónicos en sustrato .....	29
2.2.5.2.	Sistemas hidropónicos en medio líquido .....	30
2.2.5.3.	Solución nutritiva .....	32
2.2.6.	Características del género Heliconia.....	34
2.2.6.1.	Descripción botánica de la Heliconia psittacorum L. f. ....	34
2.2.6.2.	Taxonomía de la Heliconia psittacorum L. f.....	36
2.2.6.3.	Manejo de cultivo para flores tropicales.....	37
2.2.7.	Norma legal que regula metales pesados .....	37
2.2.7.1.	Constitución Política de la República del Ecuador .....	37
2.2.7.2.	Ley de Gestión Ambiental .....	37
2.2.7.3.	Ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y aprovechamiento de agua .....	38
2.2.7.4.	Código Orgánico del Ambiente .....	38
2.2.7.5.	Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente .....	38
 <b>CAPÍTULO III</b>		
3.	<b>MARCO METODOLÓGICO Y EXPERIMENTAL .....</b>	<b>39</b>
3.1.	Tipo y diseño de la investigación .....	39
3.1.1.	Tipo de investigación .....	39
3.1.2.	Diseño de investigación experimental .....	39

3.1.3.	Unidad de análisis .....	40
3.1.4.	Población de estudio.....	40
3.1.5.	Tamaño de la muestra.....	41
3.1.6.	Técnica de recolección de datos .....	41
3.2.	Parte experimental.....	41
3.2.1.	Lugar de desarrollo de la investigación .....	41
3.2.2.	Periodo experimental.....	42
3.2.3.	Especie vegetal sujeta a investigación.....	42
3.2.4.	Diseño y construcción del invernadero y sistema hidropónico .....	43
3.2.4.1.	Invernadero .....	43
a.	Materiales empleados .....	43
b.	Proceso de construcción .....	44
c.	Adecuación.....	45
3.2.4.2.	Sistema hidropónico .....	46
a.	Materiales empleados .....	46
b.	Proceso de construcción .....	47
3.2.5.	Preparación de los medios físicos.....	47
3.2.6.	Siembra y adaptación de la especie vegetal al cultivo hidropónico .....	48
3.2.7.	Preparación del medio líquido.....	49
3.2.8.	Solución nutritiva .....	49
3.2.9.	Aireación.....	51
3.2.10.	Cambios aparentes en la planta.....	52
3.2.10.1.	Análisis probit sobre la influencia de cromo (VI) en el vigor de <i>Heliconia psittacorum</i> .....	53
3.2.11.	Variables de control en el interior del invernadero .....	53
3.2.11.1.	Monitoreo y control de temperatura y humedad relativa .....	54
3.2.12.	Seguimiento de las unidades experimentales .....	54
3.2.13.	Cuantificación de cromo (VI).....	55

3.2.13.1.	Plan de muestreo de agua .....	56
3.2.13.2.	Plan de muestreo de tejido vegetal .....	57
3.2.14.	Determinación de la eficacia de la <i>Heliconia psittacorum</i> cultivada hidropónicamente para fitorremediar cromo (VI).....	58
3.2.14.1.	Calculo para la determinación de absorción de cromo (VI) en cultivo hidropónico ..	59
3.2.15.	Relaciones de concentración del metal en la planta .....	59
3.2.15.1.	Factor de bioconcentración.....	59
3.2.15.2.	Factor de translocación.....	60
3.2.15.3.	Clasificación de la planta en relación al factor de bioconcentración y translocación .....	61

#### CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	63
4.1.	Resultados .....	63
4.1.1.	Seguimiento de los cambios aparentes en la <i>Heliconia psittacorum</i> .....	63
4.1.1.1.	Análisis probit sobre la influencia de cromo (VI) en el vigor de la planta .....	68
4.1.2.	Variables de control en el invernadero .....	71
4.1.2.1.	Monitoreo de temperatura y humedad relativa .....	71
4.1.3.	Seguimiento de las unidades experimentales .....	77
4.1.3.1.	Caracterización del agua.....	77
4.1.4.	Cuantificación de cromo (VI).....	79
4.1.4.1.	Caracterización de cromo (VI) en muestras de agua y tejido vegetal .....	79
4.1.4.2.	Análisis de varianza (ANOVA) a las concentraciones de cromo (VI) en agua .....	80
4.1.4.3.	Determinación de la eficacia de la <i>Heliconia psittacorum</i> cultivada hidropónicamente para fitorremediar cromo (VI).....	81
4.1.5.	Relaciones de concentración del metal en la planta .....	83
4.1.5.1.	Análisis de varianza (ANOVA) a las concentraciones de cromo (VI) en la raíz y en la parte aérea de la planta.....	83
4.1.5.2.	Factor de bioconcentración y translocación en plantas .....	85
4.1.5.3.	Clasificación de la planta en relación al factor de bioconcentración y translocación.	85

CONCLUSIONES .....	87
RECOMENDACIONES .....	89
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b>	Heliconia psittacorum, especie vegetal utilizada en fitorremediación .....	8
<b>Tabla 2-2:</b>	Principales compuestos del cromo .....	11
<b>Tabla 3-2:</b>	Derivados de cromo y sus usos .....	12
<b>Tabla 4-2:</b>	División general para minerales de cromo .....	13
<b>Tabla 5-2:</b>	Contribuciones al cromo ambiental.....	17
<b>Tabla 6-2:</b>	Clasificación botánica del género <i>Heliconia psittacorum</i> Lf.....	36
<b>Tabla 7-3:</b>	Análisis de Varianza (ANOVA). .....	40
<b>Tabla 8-3:</b>	Diseño completamente al azar (DCA).....	40
<b>Tabla 9-3:</b>	Composición de ABOREC PLUS.....	50
<b>Tabla 10-3:</b>	Contenido en Kg de muestra (ABOREC PLUS).....	50
<b>Tabla 11-3:</b>	Características del aireador JAD, modelo Air Pump Sc-3500.....	51
<b>Tabla 12-3:</b>	Monitoreo de los cambios aparentes en la especie vegetal.....	52
<b>Tabla 13-3:</b>	Monitoreo del tamaño de la planta y raicillas nuevas.....	53
<b>Tabla 14-3:</b>	Monitoreo de temperatura y humedad relativa al interior del invernadero .....	54
<b>Tabla 15-3:</b>	Métodos analíticos para caracterizar el agua.....	55
<b>Tabla 16-3:</b>	Monitoreo de agua .....	56
<b>Tabla 17-4:</b>	Necrosis en <i>Heliconia psittacorum</i> .....	64
<b>Tabla 18-4:</b>	Vigrosidad en <i>Heliconia psittacorum</i> .....	66
<b>Tabla 19-4:</b>	Longitud promedio ganada por la planta.....	67
<b>Tabla 20-4:</b>	Raíces nuevas en la especie vegetal .....	68
<b>Tabla 21-4:</b>	Modelo de regresión estimado .....	69
<b>Tabla 22-4:</b>	Análisis de la desviación.....	69
<b>Tabla 23-4:</b>	Predicciones Inversas para Concentración .....	70
<b>Tabla 24-4:</b>	Control de temperatura (°C) al interior del invernadero .....	72
<b>Tabla 25-4:</b>	Control de humedad relativa (%) al interior del invernadero .....	75
<b>Tabla 26-4:</b>	Caracterización físico-química inicial de la muestra de agua de regadío con presencia de cromo (VI).....	77
<b>Tabla 27-4:</b>	Caracterización físico-química intermedia de los tratamientos A, B y C .....	78
<b>Tabla 28-4:</b>	Caracterización físico-química final de los tratamientos A, B y C.....	78
<b>Tabla 29-4:</b>	Concentración de cromo (VI) en agua en (mg/L).....	79
<b>Tabla 30-4:</b>	Concentración de cromo (VI) en tejido vegetal (mg/Kg) .....	80
<b>Tabla 31-4:</b>	Análisis de varianza a los tres tratamientos del metal pesado en agua .....	80

<b>Tabla 32-4:</b>	Porcentaje de absorción de Cr (VI) en agua por la <i>Heliconia psittacorum</i> .....	82
<b>Tabla 33-4:</b>	Análisis de varianza a los tres tratamientos del metal pesado en la raíz de la <i>Heliconia psittacorum</i> .....	83
<b>Tabla 34-4:</b>	Análisis de varianza a los tres tratamientos del metal pesado en la parte aérea de la <i>Heliconia psittacorum</i> .....	84
<b>Tabla 35-4:</b>	Factor de bioconcentración y translocación de cromo (VI) en la planta.....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-2.</b>	Curtido de pieles .....	14
<b>Figura 2-2.</b>	Ciclo ambiental del Cromo .....	16
<b>Figura 3-2.</b>	Modelo hipotético de transporte y toxicidad del cromo (VI) en plantas.....	18
<b>Figura 4-2.</b>	Influencia del pH sobre la absorción de algunos metales, a diferentes pH.....	19
<b>Figura 5-2.</b>	Esquema general de la descomposición de iones metálicos en un proceso natural de fitorremediación .....	23
<b>Figura 6-2.</b>	Técnicas de Fitorremediación .....	24
<b>Figura 7-2.</b>	Raíz de lirio acuático en tratamiento de Pb (Rizofiltración) .....	26
<b>Figura 8-2.</b>	Sistema de flujo profundo a gran escala.....	31
<b>Figura 9-2.</b>	Sistema flotante a base de espuma .....	31
<b>Figura 10-2.</b>	Sistema NFT en tubos de PVC .....	32
<b>Figura 11-2.</b>	Forma botánica de <i>Heliconia psittacorum</i> con la característica inflorescencia .	35

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-3.</b> Modelo del Invernadero tipo túnel construido en las inmediaciones de la ESPOCH .....	43
<b>Gráfico 2-3.</b> Modelo del sistema de cultivo Hidropónico de <i>Heliconia psittacorum</i> construido en la ESPOCH .....	46
<b>Gráfico 3-4.</b> Presencia de necrosis en plantas de <i>Heliconia psittacorum</i> .....	65
<b>Gráfico 4-4.</b> Vigorosidad en plantas de <i>Heliconia psittacorum</i> .....	67
<b>Gráfico 5-4.</b> Variación de temperatura al interior del invernadero .....	74
<b>Gráfico 6-4.</b> Humedad relativa promedio al interior del invernadero .....	77
<b>Gráfico 7-4.</b> Concentración de Cr (VI) en agua.....	81
<b>Gráfico 8-4:</b> Porcentaje final absorbido de Cr (VI) en agua por la <i>H. psittacorum</i> .....	82
<b>Gráfico 9-4:</b> Concentración de Cr (VI) en raíz y parte aérea de la <i>Heliconia psittacorum</i> .....	84



## ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo A.** Invernadero tipo túnel para el estudio de la *Heliconia psittacorum*
- Anexo B.** Modificación de las cortinas del invernadero
- Anexo C.** Recipientes para el cultivo hidropónico
- Anexo D.** Cubiertas de las camas hidropónicas
- Anexo E.** Siembra de *Heliconia psittacorum*
- Anexo F.** Fase de adaptación de la *Heliconia psittacorum* en cultivo hidropónico
- Anexo G.** Incorporación del contaminante a las muestras de agua
- Anexo H.** Suministro de aireación al cultivo hidropónico
- Anexo I.** Presencia de necrosis en la especie vegetal *Heliconia psittacorum*
- Anexo J.** Toma de la longitud del tallo y conteo de raíces nuevas en la *H. psittacorum*
- Anexo K.** Monitoreo de temperatura
- Anexo L.** Análisis en laboratorio de la dureza del agua
- Anexo M.** Muestreo del agua
- Anexo N.** Análisis en laboratorio de cromo (VI) en agua
- Anexo Ñ.** Muestreo del tejido vegetal
- Anexo O.** Determinación de cromo (VI) en la biomasa vegetal
- Anexo P.** Registro de la longitud del tallo de la *H. psittacorum*
- Anexo Q.** Resultados iniciales del análisis físico-químico de agua en el Laboratorio de Calidad del Agua de la ESPOCH
- Anexo R.** Resultados intermedios del análisis físico-químico de agua en el Laboratorio de Calidad del Agua de la ESPOCH
- Anexo S.** Resultados finales del análisis físico-químico de agua en el Laboratorio de Calidad del Agua de la ESPOCH

**Anexo T.** Resultados del análisis químico del tejido vegetal en el Laboratorio de Análisis  
Técnicos de la ESPOCH

## SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

<b>%</b>	Porcentaje
<b>°C</b>	Grados Centígrados
<b>cm</b>	Centímetro
<b>Cr O<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	Anión cromato
<b>Cr (OH)<sub>3</sub></b>	Hidróxido crómico
<b>DBO<sub>5</sub></b>	Demanda Bioquímica de Oxígeno al quinto día
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxígeno
<b>K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub></b>	Dicromato de potasio
<b>g/L</b>	Gramos por litro
<b><i>H. psittacorum</i> L. f.</b>	<i>Heliconia psittacorum</i> L. f.
<b>Hz</b>	Hertz
<b>Hpa</b>	Hectopascal
<b>L. f.</b>	Linnaeus filius
<b>m</b>	Metros
<b>mg/g</b>	Miligramos por gramos
<b>Mg/Kg</b>	Miligramo por kilogramo
<b>Mg/L</b>	Miligramos por cantidad de litro
<b>mL</b>	Mililitro
<b>mm</b>	Milimetro
<b>msnm</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>nm</b>	Nanómetro
<b>pH</b>	Potencial Hidrógeno
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>PVC</b>	Policloruro de vinilo
<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto
<b>μS/cm</b>	Microsiemens por centímetro
<b>V</b>	Voltios

## RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo conocer la eficacia de la *Heliconia psittacorum* (heliconiaceae) como potencial fitorremediadora de cromo (VI) en cultivo hidropónico, para lo cual se contaminó agua de riego procedente del reservorio de la Facultad de Recursos Naturales de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo con dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ). Las concentraciones obtenidas fueron 10 mg/L, 20 mg/L y 30 mg/L de  $Cr^{6+}$ , designándoles como tratamientos A, B y C respectivamente que mediante un Diseño Completamente al Azar (DCA) con tres replicas se llevó a cabo. Para el cumplimiento del objetivo se diseñó y construyó un invernadero de 35 m<sup>2</sup> en las inmediaciones de la Facultad de Recursos Naturales así como el sistema para el cultivo hidropónico, se caracterizó las muestras y se registró las variables de control temperatura y humedad relativa. Para proporcionar un ambiente de crecimiento óptimo para la especie vegetal se suministró aireación permanente al cultivo hidropónico y solución nutritiva en tres ocasiones los días 1, 30 y 60. Los cambios aparentes en la especie vegetal fueron registrados para determinar el vigor de la planta. La eficacia de remoción de cromo (VI) en 60 días fue de 20,83% en el tratamiento A, 11,58% en el tratamiento B y 3,69% en el tratamiento C, obteniendo una mayor eficacia en el tratamiento A, cuya concentración de contaminante es la más baja. La planta tiene una elevada capacidad de translocación de metales pesados a la parte aérea y una capacidad limitada de bioconcentración en la raíz por lo que se concluye que es excluyente de metales pesados. Se recomienda el empleo de la especie *Heliconia psittacorum* para fitorremediación de aguas con  $Cr^{6+}$  a concentraciones inferiores de los 10 mg/L para así mejorar la absorción del metal y evitar su muerte.

**PALABRAS CLAVES:** <BIOTECNOLOGÍA>, <BIORREMEDIACIÓN>, <FITORREMEDIACIÓN>; <ESPECIE VEGETAL (*Heliconia psittacorum*)>; <CROMO (VI)>; <VIGOR DE LA PLANTA>; <CULTIVO HIDROPÓNICO>.

## SUMMARY

The present study aims to know the efficacy of *Heliconia psittacorum* (heliconiaceae) as a potential phytoremediation of chromium (VI) in hydroponic crops, for which irrigated water from the reservoir of the Faculty of Natural Resources of the Polytechnic School of Chimborazo with potassium dichromate ( $K_2Cr_2O_7$ ). The concentrations obtained were 10 mg/L, 20 mg/L and 30 mg/L  $Cr^{6+}$  designating them as treatments A, B and C respectively, using a Completely Random Design (CRD) with three replicates. To achieve the objective, a greenhouse of 35 m<sup>2</sup> was designed and built in the facilities of the Faculty of Natural Resources as well as the system for hydroponic crops, the samples were characterized and the control temperature and relative humidity variables were recorded. To provide an optimum growth environment for the plant species, permanent aeration was given to the hydroponic crops and nutrient solution on three occasions, on days 1, 30 and 60. The apparent changes in the plant species were recorded to determine the strength of the plant. The efficiency of removal of chromium (VI) in 60 days was 20,83% in treatment A, 11,58% in treatment B and 3,69% in treatment C, obtaining a greater efficacy in treatment A, whose pollutant concentration is the lowest. The plant has a high capacity of translocation of heavy metals to the aerial part and a limited capacity of bio-concentration in the root, this is the reason why it is concluded that it is excluding of heavy metals. The use of the *Heliconia psittacorum* species for phytoremediation of water with  $Cr^{6+}$  at concentrations lower than 10 mg/L is recommended in order to improve the absorption of the metal and avoid its death.

**KEYWORDS:** <BIOTECHNOLOGY>, <BIOREMEDIATION>, <PHYTOREMEDIATION>, <PLANT SPECIES (*Heliconia psittacorum*)>, <CHROMIUM (VI)>, <STRENGTH OF THE PLANT>, <HYDROPONIC CROP>

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la contaminación ambiental generada por la utilización de metales pesados ha incrementado de forma dramática, acarreando consigo un grave problema en las fuentes hídricas por las descargas generadas en estas. Los metales pesados como el cromo (VI) que usualmente son de origen antropogénico no se pueden degradar por lo que constituyen una fuerte amenaza para el ambiente.

El cromo se utiliza en diversas industrias de las que destacan la metalúrgica, química, materiales refractarios y curtiembres. Esta última con el paso del tiempo ha ido cambiando progresivamente en Ecuador, por el incremento de la demanda y la exigencia en la calidad en los artículos elaborados que necesitan de mayores cantidades de productos químicos para su curtido.

El curtido de cuero puede realizarse a través de dos métodos, uno en base de sales de cromo y otra a base de agentes vegetales. Un 80% de las fábricas de curtiduría emplea las sales de cromo para tratar las pieles, generando así desechos en estado sólido, líquido y gaseoso. Pero son los desechos líquidos los más representativos, ya que necesitan de tratamientos que suponen un cierto grado de complejidad antes de ser vertidos a los cauces naturales de agua.

El cromo resultante de estos procesos es uno de los principales contaminantes presentes en los efluentes de curtiembres que genera impactos nocivos en el ambiente. Con los métodos convencionales que se aplican para tratarlo no es suficiente, ya que por sí solos no llegan a bajar las altas concentraciones, siendo necesario aplicar otras alternativas como la rizofiltración que presenten una relación costo-beneficio frente a dichos métodos utilizados.

La rizofiltración es una de las alternativas para tratar metales pesados en agua, Las plantas usadas en rizofiltración son cultivadas en invernadero, con sus raíces sumergidas en agua y no en tierra. Se han realizado investigaciones en la India donde se aplicó para el tratamiento de agua contaminada con cadmio, plomo y níquel raíces de mostazo geranio y girasol. La rizofiltración incluso se ha utilizado para tratar aguas contaminadas con reactivos en Chernobyl empleando girasoles. Pese aun esta técnica se encuentra en etapa de investigación. (Guevara et al., 2009, pp. 871-872)

En el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados las plantas tienen un papel fundamental en la absorción de las sustancias tóxicas. Estas especies vegetales tienen que adaptarse a un ambiente de estrés por la exposición a las que son sometidas frente a los contaminantes. (Guevara et al., 2009, p. 872) La *heliconia psittacorum* es un especie neotropical, de valor comercial en el plano ornamental. Estas plantas pueden encontrarse a una altitud que va de entre los 500 y 1500 msnm. Estudios recientes han revelado resultados positivos en biorremediación. Mostrando evidencias de su capacidad adaptativa a diferentes condiciones ambientales, lo que la hace muy atractiva para ser utilizada en cultivo hidropónico para el tratamiento de aguas con presencia de cromo (VI). (Peña-Salamanca et al., 2013, p. 470)

De este contexto surgen interrogantes como: ¿Cuál será la eficacia de la *Heliconia psittacorum* para fitorremediar cromo (VI) en cultivo hidropónico?, ¿Cuál será el vigor de la planta frente a las elevadas concentraciones de cromo (VI)?, ¿Cuál será el factor de bioconcentración y el factor de translocación de la planta? Y ¿La planta será hiperacumuladora, biorremediadora o excluyente de cromo (VI)?

## 1.1. Identificación del problema

En Ecuador la industria del curtido ha ido en aumento de manera progresiva generando un gran volumen de aguas residuales resultantes de sus procesos. Estos efluentes contienen pelos, piel, sangre, estiércol, así como sulfuros, aminos, cromo, cal, ácidos, tintes, solventes entre otros. Se menciona al cromo presente con una concentración que oscila entre los 4000 y 10000 mg/L. (García-Jiménez; et al, 2009, pp. 1-3) Los problemas que presenta el uso de sales de cromo corresponden a la cantidad de curtiente que no es fijado (un tercio del total) y que se mantiene en los reflujos, lo que impide el uso de los materiales residuales principalmente de este metal.

En estos efluentes, el Cr puede hallarse como hexavalente  $\text{Cr}^{6+}$  o como trivalente  $\text{Cr}^{3+}$ , siendo el último el más estable y mil veces menos tóxico que el  $\text{Cr}^{6+}$ . En la mayoría de los casos el Cr total se encuentra en los cuerpos de agua es menor a los 10 mg/L, puesto que el rango de pH que posee el agua, el  $\text{Cr}^{3+}$  se encuentra como  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  que no es soluble. El cromo  $\text{Cr}^{6+}$  es soluble en la forma  $\text{CrO}_4^{2-}$  y cuando el pH es ácido solo se encuentra  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ . Pero cuando los efluentes son vertidos en los cauces naturales de agua, la contaminación alcanza concentraciones mayores a los 25 mg/L. (Chávez, 2011, pp. 43-45)

Las zonas aledañas a las descargas de los efluentes de curtiembres son las que mayor impacto reciben, pero la contaminación no se limita a un rango menor ya que los ríos se desplazan cientos de kilómetros arrastrando consigo el compuesto produciendo la alteración de ecosistemas. (Beltrán y Gómez, 2015, p. 83) La duración del impacto en las aguas es permanente, porque los contaminantes descargados en un cauce como desechos permanecen allí.

El cromo forma parte de los metales pesados que llegan a ser indestructibles ocasionando muchos inconvenientes, no pueden ser degradados de forma química ni biológica, terminando en la cadena alimenticia y bioacumulándose en el cuerpo humano. (Wu Gang et al., 2009, pp. 3-6) Relacionándose con alteraciones de nacimiento, cáncer, daños a la piel, pérdida de funciones en el hígado y otros órganos renales. (Rajendran et al., 2003, pp. 935-944) Este metal pesado genera iones de interferencia en las funciones metabólicas, procesos bioquímicos y fisiológicos como la respiración, al igual que daña organelos celulares.

Los compuestos de cromo están clasificados en el grupo 1 de elementos carcinógenos según la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC). Así también la Norma 29 CFR 1910.1200 de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) considera carcinógeno a los compuestos de cromo VI. (Montoya et al., 2010, pp. 82-84)



## 1.2. Justificación de la investigación

Con el paso del tiempo y la actividad humana surge la necesidad de proteger los suelos y recursos hídricos remediando la contaminación producida por iones metálicos tóxicos. En septiembre del 2008, Ecuador a través de la nueva Constitución aprobada por referéndum, instaure una nueva ley ambiental que exige la implementación de nuevas medidas ambientales para reducir la contaminación industrial en el país.

Para el tratamiento de efluentes que provengan de curtiembres, se han establecido niveles muy bajos de límites permisibles para las descargas en los cauces de agua, siendo 0.5 mg/L para cromo por el peligro que representa. Existen diversos métodos que pueden ser utilizados para tratar estas aguas como son la precipitación química, adsorción, oxidación, y filtración. Se debe indicar que por sí solos no son suficiente para reducir concentraciones tan altas generadas en la industria del curtido, lo que ha impulsado la búsqueda de nuevas alternativas como la rizofiltración, (Quishpe et al., 2012, p. 117) ya que los metales pesados no pueden ser degradados como los componentes orgánicos y es así que los procesos de remediación, se limitan a la movilización y/o inmovilización de estos.

A través del uso de plantas, en la fitoextracción se puede remover contaminantes como un proceso natural e inofensivo para el ambiente. (Calderon, 2009, p. 7) Por ser tecnología verde que presenta gran afinidad con la naturaleza, bajos costo y la facilidad de implementación, al ser una técnica económicamente competitiva en relación a otras alternativas de remediación.

Se propone un estudio de la eficacia de absorción del cromo (VI), presente en agua utilizando la planta y *Heliconia psittacorum* (heliconiaceae), identificada como potencial bioacumuladora de metales pesados, pudiendo ser empleada en la recuperación, (Madera-Parra et al, 2014, pp. 179-183) a través de tecnología verde y la técnica de siembra en agua (hidroponía). Dicha técnica está tomando mucha fuerza en muchos países donde se utilizan los recursos que las personas tienen a la mano, tales como materiales de desecho y espacios sin utilizar. Esta investigación es relevante por cuanto resulta beneficiosa con la población humana, el entorno y su equilibrio.

Las Heliconias son plantas endémicas de América, ubicadas desde México central, el Caribe y Sudamérica. Crecen en las tierras húmedas de los trópicos a nivel del mar hasta los 2800 msnm. Son propias de la Amazonía ecuatoriana, donde de manera silvestre nacen en la montaña en grandes cantidades, por lo que resultan idóneas para ser usadas en investigación sin que afecte el equilibrio de los ecosistemas donde se desarrollan naturalmente.

En la ciudad de Riobamba se encuentra ubicada la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, con dirección Panamericana Sur km 1 ½, con espacio para construir un invernadero en las inmediaciones de la Facultad de Recursos Naturales, para la adaptación y estudio de la *Heliconia psittacorum* (heliconiaceae) en el medio hidropónico. Haciendo similitud a la última fase de recuperación de los efluentes provenientes de curtiembres a través de soluciones sintéticas, donde la concentración del Cr<sup>6+</sup> es similar a la vertida en los ríos.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. *Objetivo General***

- Evaluar la eficacia de la *Heliconia psittacorum* (heliconiaceae) cultivada hidropónicamente para la fitorremediación de aguas con presencia de cromo (VI).

#### **1.3.2. *Objetivos Específicos***

- Determinar el efecto de las dosis de cromo (VI) en el vigor de la planta *Heliconia psittacorum* (heliconiaceae) en hidropónia.
- Valorar la eficacia que presenta la planta *Heliconia psittacorum* (heliconiaceae) para absorber cromo (VI) en agua, por medio de cultivo hidropónico.
- Conocer el factor de bioconcentración (BFC) de cromo (VI) en la *Heliconia psittacorum* (heliconiaceae).

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

A través del tiempo se han registrado elevados niveles de cromo en los efluentes líquidos provenientes de la industria en particular de las curtiembres pese a los tratamientos convencionales aplicados previo a sus descargas, como medida se ha optado por la rizofiltración que es una técnica que emplea raíces de plantas como “bombas extractoras” de metales pesados.

La rizofiltración usa plantas que se cultivan en medios hidropónicos. Término que se designa a las raíces que se encuentran sumergidas en una solución líquida en lugar de tierra. Para esto las plantas deben tener sus raíces bien desarrolladas. Requisito que debe cumplir la especie vegetal para posterior ser puesta en contacto con el efluente contaminado a tratar y absorber los metales pesados y el agua. (Quishpe et al., 2012, p. 118)

Todas las plantas presentan capacidad de absorción de metales del suelo o el agua, pero en distinto grado, dependiendo de la especie vegetal y las características. Algunas basan su resistencia a los metales pesados a través de una estrategia de exclusión del metal limitando el transporte de este a la parte aérea, mientras que otras plantas acumulan el metal en la parte aérea sin generarles toxicidad. Esta exclusión es característica de especies sensibles y tolerantes a los metales, mientras que la acumulación corresponde a especies que viven en lugares contaminados o metalíferos (Llugany et al., 2007, p. 5)

(McGrath et al., 1993, pp. 673-675) Mencionan que desde los años noventa se han realizado experimentos utilizando plantas hiperacumuladoras para extraer metales de lugares contaminados, y desde entonces se han descubierto muchas plantas con esa capacidad de acumulación de distintos metales (*Alyssum sp.*-Ni, *Thlaspi caerulescens*Zn/Cd, *Melastoma malabanthricum* Al, etc.). Las especies vegetales son escogidas por el potencial fisiológico, como el caso de enzimas presentes para asimilar y tolerar sustancias tóxicas, por sus tasas de crecimiento, por la profundidad de sus raíces y su habilidad para bioacumular y/o degradar contaminantes. (Peña-Salamanca et al., 2005, pp. 43-44)

Las plantas secuestran los nutrientes y son almacenados tanto en las raíces como en las hojas y para el caso de los metales pesados los acumulan en otros tejidos, siendo muy útiles en la biorremediación de aguas y suelos. (Bragato et al., 2006, pp. 967-975) Entre los mecanismos de transformación o eliminación de las plantas se tiene: sedimentación, precipitación, transformación química, adsorción, cambio iónico, biodegradación, rompimiento, transformación de sustratos y asimilación de nutrientes. (Haberl et al., 2003, pp. 109-124)

A través de una década de estudio del género *Heliconia* varios autores concluyen que tiene gran potencial para fitorremediar (Tabla 1-2). Dichos trabajos se encontraban en la búsqueda de nuevas alternativas tecnológicas de descontaminación mediante el uso de plantas que movilicen los contaminantes en varias direcciones. Los estudios realizados han abierto una brecha de interrogantes para responder, tales como el desconocimiento de los mecanismos que utiliza la especie para la eliminación de los contaminantes. Las *Heliconias* no solo se encargan del tratamiento en las aguas residuales, sino que además brindan beneficios económicos. (Belmont y Metcalfe, 2003, pp. 235-241)

**Tabla 1-2:** *Heliconia psittacorum*, especie vegetal utilizada en fitorremediación

ESPECIE	APLICACIÓN	REFERENCIA
<i>Heliconia psittacorum</i> (heliconiaceae)	Efecto en el crecimiento al riego con lixiviados de rellenos sanitarios	Torres y Vásquez (2010)
	Eliminación de DBO <sub>5</sub> , DQO, Nitrato, TKN, NH <sub>4</sub> , orto fosfato y SST	Ascuntar y Toro (2007); Gutiérrez (2009); Mosquera (2010); Ascuntar et al (2009); Sandoval (2010)
	Eliminación de DQO, P-PO <sub>4</sub> , NH <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub>	Konnerup et al (2009)
	Eliminación de materia orgánica y nutrientes	Paulo et al (2008)
	Eliminación de metales pesados Cd (II), Cr (VI), Pb (II) y Hg (II)	Madera et al (2013)
	Eliminación de Cr(VI) y Nitrógeno	Cortes et al (2013a)
Eliminación de DQO, DBO <sub>5</sub> y NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Cortes et al (2013b)	

**Fuente:** (Peña-Salamanca et al., 2013) Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación

En la actualidad se han llevado a cabo ciertos estudios que evalúan la capacidad de la *Heliconia psittacorum* para remediar aguas residuales, obteniéndose resultados efectivos en la biorremediación, tales experimentos demuestran una cierta tolerancia por parte de la *H. psittacorum* a una amplia gama de condiciones ambientales, lo que la convierte en una especie

llamativa para ser utilizada en sistemas naturales como los humedales construidos subsuperficiales para tratar aguas residuales. (Peña-Salamanca et al., 2013, pp. 477-478)

La *H. psittacorum* en estudios realizados con lixiviados presenta tolerancia en el tratamiento. De los resultados obtenidos se menciona su capacidad como potencial fitorremediadora a través de humedales construidos para el tratamiento de lixiviados que contienen  $\text{Cr}^{+6}$ ,  $\text{Hg}^{+2}$ ,  $\text{Pb}^{+2}$  y  $\text{Cd}^{+2}$ . Las evidencias indican que ni una sola planta murió al ser sometida durante ocho semanas al riego. (Aulestia, 2012, pp. 38-41)

Los efluentes ricos en nutrientes son mejor aprovechados por la *H. psittacorum* presentando excelentes resultados en la remoción. Donde se observa que existe una relación directa entre la carga orgánica y la remoción al utilizar humedades artificiales, concluyendo que ha mayor presencia de carga orgánica, mejores resultados son obtenidos en la descontaminación del efluente. (López Revelo, 2016, pp. 8-13)

(Sánchez y Vélez, 2016, pp. 103-118) Hablan de las cualidades que posee la *H. psittacorum* como fitorremediadora. Esta macrófita nativa puede ser usada para tratar aguas residuales y ser una alternativa viable en zonas de escasos recursos. Los mejores resultados se vieron reflejados en la disminución de la  $\text{DBO}_5$  y  $\text{DQO}$  con remociones mayores al 80%. Mientras que para metales los resultados más óptimos fueron obtenidos en la remoción de cobre con un porcentaje superior al 75%. A esta especie vegetal se le atribuye principalmente una fácil asimilación de nutrientes, degradación microbiana y aporte de oxígeno a la raíz.

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1. Metales pesados**

Los metales pesados (MP) forman parte de la corteza terrestre, los cuales no pueden ser destruidos ni degradados fácilmente por no poseer funciones metabólicas específicas, razón por la cual son conocidos por muchas personas como elementos altamente tóxicos, pese aun que esta aseveración dependerá de la concentración en la que se encuentren.

Los MP representan el 75% de todos los elementos químicos conocidos, esta designación se da a aquellos elementos cuya densidad es mayor o igual a  $5 \text{ g/cm}^3$ , con número atómico mayor a 20 (excluidos alcalinos y alcalinos térreos). Algunos ejemplos de metales pesados o metaloides son:

Cromo (Cr), Mercurio (Hg), Plomo (Pb), Arsénico (As), Cadmio (Cd) y otros. (Lucho-Constantino et al., 2004, pp. 2-5)

Bajo condiciones normales los metales pesados no representan un peligro para los ecosistemas, ya que se pueden encontrar en cantidades fijas y formas químicas no solubles, al igual que formando iones libres, o realizando reacciones Redox. Pero esta realidad se ve alterada por el incremento de las actividades antropogénicas, que han acarreado como consecuencia su gran acumulación en los suelos, cantidades que generan alteraciones en el equilibrio y contaminan los recursos hídricos. (Zúñiga Batista, 1999, pp. 31-33)

Por su característica de acumulación en animales como en vegetación pueden llegar a acumularse en el tejido humano ya sea por vías de ingestión o absorción dérmica (por medio del agua), así como también pueden afectar las partículas de polvo procedentes del suelo.

Existen cuatro vías de movilización para los metales pesados:

- Retenidos y transformados en el suelo
- Absorbidos por las plantas (posterior animales); que llegan a ser metabolizados por el organismo
- Volatilizados a la atmósfera
- Evacuados en las aguas de escorrentía (superficiales y subsuperficiales)

Según (Zúñiga Batista, 1999, pp. 34-36) los metales pesados pueden provenir de dos fuentes: las naturales y las antropogénicas. Que son descritas así.

- Las fuentes naturales se subdividen en intemperismo (meteorismo) y emisiones volcánicas. Dentro de las fuentes naturales se puede mencionar minerales primarios y coprecipitados con los minerales secundarios. Se conoce como minerales primarios a los constituyentes de las rocas y como secundarios a la cristalización de los productos de intemperismo.
- Las fuentes originadas por el hombre se clasifican en fijas y móviles. En el primer grupo forman parte las industrias, carreteras entre otras. Mientras que el segundo grupo está conformado por lodos residuales, fertilizantes, cenizas, humos, pesticidas y riego.

## 2.2.2. Cromo

### 2.2.2.1. Generalidades

Este elemento se descubrió en 1762, tiene un número atómico de 24, peso atómico 51.996, densidad 7.19 g/ml. El color que presenta es blanco plateado, duro y un tanto quebradizo pero manejable cuando no está tensionado o muy puro. Es capaz de formar compuestos con otros elementos en estados de oxidación (II), (III) y (VI) y generar también peróxidos, ácidos y cromatos al igual que halogenuros de cromo.

**Tabla 2-2:** Principales compuestos del cromo

ESTADO DE OXIDACIÓN	COMPUESTO
<b>Trivalente</b>	óxido crómico
	sulfato Crómico
<b>Hexavalente</b>	trióxido de cromo
	dicromato sódico
	dicromato potásico
	cromato de plomo
	cromato de cálcico
	cromato de zinc

**Fuente:** (Mosquera, 2010) Cromo en Urgencias Toxicológicas

**Realizado por:** Jennifer Orejuela, 2017

El mineral de cromo más cuantioso es la cromita ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ), variedad de la serie isomórfica del grupo Espinela, los depósitos de Cromita pueden ser de dos tipos: estratiformes y podiformes por lo que González señala que:

*Los depósitos estratiformes se originan en una zona crónica estable perturbada por una pluma de manto, en la que se inicia un magmatismo bimodal como producto de una cristalización fraccionada. Los depósitos podiformes se originan en zonas de colisión entre un margen continental y una zona de subducción, como fragmentos alóctonos emplazados tectónicamente.* (González, 2007, pp. 5-7)

El cromo (Cr) es un elemento que se llega a encontrar en medios vivos como inertes tal es el caso de plantas, animales, el suelo, los humos y gases volcánicos. Presenta distintas valencias o estados de oxidación los cuales son: -2, 0, +2, +3 y +6 y puede tener variadas formas en el ambiente. Los principales son el cromo trivalente ( $\text{Cr}^{3+}$ ) y el cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ). El cromo (III) es un



nutriente esencial para el ser humano, por otra parte el cromo metálico (0) y derivados del cromo hexavalente, provienen de las actividades que realiza el hombre. (Albert, 2002, p. 227)

El potencial de oxidación del cromo hexavalente es muy grande y una vez que se mezcla con la materia orgánica rápidamente se reduce a cromo trivalente. El cual es menos soluble en agua pero también presenta la capacidad de enlazarse con moléculas lipofílicas. Visto desde el punto ambiental presenta mayor facilidad de degradación que el cromo VI. (Montoya et al., 2010, p. 82)

#### 2.2.2.2. Propiedades Fisicoquímicas del Cromo

El cromo es el sexto elemento en abundancia en la corteza de la tierra, posee una estructura cúbica centrada, debe su nombre al termino griego *chromos* que significa color. Es un metal pesado de la primera serie de metales de transición, lo que le proporciona sus principales características químicas y bioquímicas. El cromo forma iones complejos. Varios de los compuestos de cromo son paramagnéticos y presentan coloración.

**Tabla 3-2:** Derivados de cromo y sus usos

VALENCIAS DEL CROMO	DERIVADOS	USOS
Cr <sup>3+</sup> Sus derivados Predominan en el ambiente ya que son los más estables	Óxido crómico	Estable, resistente a los ácidos, punto de fusión alto. Se utiliza como pigmento con el nombre de “verde de cromo”
Cr <sup>6+</sup> sus derivados (cromatos y dicromatos ) son agentes oxidantes energéticos en medio ácido, en el que pasan a cromo (III)	Dicromato de potasio	Se utiliza mucho en la industria y en operaciones químicas
	Dicromato sódico	Se utiliza en el curtido de pieles, que forma un compuesto insoluble con las proteínas del cuero
	Cromato de plomo	Se utiliza como pigmento, tiene el nombre de “amarillo de cromo”

**Fuente:** (Albert, 2002). Toxicología Ambiental

**Realizado por:** Jennifer Orejuela, 2017

Dentro de las propiedades mecánicas destaca la dureza y resistencia a la tensión, por ser las que establecen la capacidad de uso que posee la sustancia. Presenta un alcance de enrollamiento y forjado relativamente bajos pero cuando no existe la presencia de oxígeno, hidrógeno, carbono y nitrógeno es muy manejable. (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. PRTR, 2006, p. 1)

### 2.2.2.3. Usos industriales del cromo

El cromo es utilizado principalmente en tres campos industriales: metalúrgico, químico y materiales refractarios. Pero no es utilizado como metal puro, puesto que en frío es duro y un tanto quebradizo y en caliente se oxida. Posee diversas características que lo convierten en un metal cotizado en la industria.

**Tabla 4-2:** División general para minerales de cromo

MINERALES DE CROMO	GRADO EN LA INDUSTRIA	PORCENTAJE	RELACIÓN
Cromita alta en cromo	Grado metalúrgico	46% o más de $\text{Cr}_2\text{O}_3$	Relación Cr: Fe 2:1 o más
Cromita alta en hierro	Grado químico	40%-46% de $\text{Cr}_2\text{O}_3$ Promedio 44% de $\text{Cr}_2\text{O}_3$	Relación Cr: Fe >1,5 Relación Cr: Si 2:1 o más
Cromita alta en aluminio	Grado refractario	30%-40% de $\text{Cr}_2\text{O}_3$ Y 25%-32% $\text{Al}_2\text{O}_3$	Relación Cr: Fe 2,0-2,5:1

**Fuente:** (González, 2007) Recursos minerales de Colombia: Cromo

**Realizado por:** Jennifer Orejuela, 2017

La industria de materiales refractarios acapara los aceros inoxidable. El acero de cromo es fuerte y tiene gran resistencia por lo que es empleado en la elaboración de varios artefactos como cajas fuertes, proyectiles, entre otros. La industria de materiales refractarios se encarga de la elaboración de ladrillos que tienen por base cromo y magnésita para hornos metalúrgicos. (Albert, 2002, pp. 231-232)

En el campo industrial de la metalurgia, el cromo confiere, resistencia y brillo como parte de las aleaciones y dentro de las cuales se mencionan las siguientes:

- Ferrocromo: Aleación de hierro y cromo, que tiene resistencia a la corrosión y alta durabilidad.
- Superaleaciones: Corresponden a la industria automotora, espacial y eléctrica.
- Acero inoxidable: Se emplea en materiales de construcción, reservorios de agua, automovilismo, arquitectura y otros. Corresponde entre el 8%- 12% de cromo presente.

De los compuestos químicos del cromo el campo de aplicación es extenso, ejemplo: curtido de pieles, tratamiento para la madera, colorantes y pigmentos. En cantidades mínimas su uso se limita a lodos de perforación, inhibidores de corrosión, cintas magnéticas, tratamiento de aguas, textiles y otros. Los productos químicos de cromo proporcionan características de estabilidad y durabilidad del color, puede ser usado como pigmento o catalizador primordialmente (González, 2007, pp. 5-6)

- El cromo en la industria del curtido

El curtido de las pieles de animales corresponde a un proceso complejo de donde se obtiene el cuero (Figura 1-2), que se realiza a través de una serie de pasos donde se produce una gran cantidad de agua residual, residuos sólidos y emisiones. Sus principales fuentes de cuero son el ganado vacuno, cerdos, corderos y ovejas. (McCann, 2000, pp. 3-5)



**Figura 1-2.** Curtido de pieles

**Fuente:** (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006)

La piel está formada por tres partes: la epidermis (piel superficial), el cutis (piel perteneciente al cuero) y el subcutis (tejido conjuntivo). Para su curtido se utilizan dos métodos uno en base a sales de cromo y el otro a base de agentes vegetales. La mayoría de la industria realiza sus procesos de curtido en base a las sales de cromo. (Ministerio de Ambiente de Ecuador, 2010, pp. 127-128)

- Proceso de curtido con agentes vegetales.

Se utiliza extractos vegetales que proceden de hojas, madera o raíces. En su mayoría de plantas tropicales o subtropicales. Las características conferidas son la suavidad y versatilidad del producto una vez culminado. Para lograr que se impregne el agente de curtiembre se debe sumergir el cuero en un caldo formado por: agua, alumbre, tamino y sal. Se debe controlar la

mezcla periódicamente. Para el procesamiento de las pieles el pH debe ser ácido, alrededor de 5. Si la mezcla tendiese a la alcalinidad se deberá agregar una sal ácida (alumbre), por el contrario si se transforma en ácida se deberá añadir una sal de origen básico (cloruro de sodio).

Para llevar acabo todo el proceso es necesario contar con electricidad, agua, alumbre, sal y extracto vegetal. Producto de esta actividad se producirán aguas residuales con una elevada carga orgánica y los envases de los productos usados.

- Proceso de curtido en base a las sales de cromo.

Este método es el más empleado, pero el que mayor contaminación produce a causa del cromo. A través de agentes curtientes minerales, usando variadas sales de cromo a distintas proporciones. De manera preliminar se escurre la piel para eliminar el exceso de humedad que posea, con una máquina divisora y cromo trivalente en un medio ácido. Es posible obtener un material estable, el cuero. (Ministerio de Ambiente de Ecuador, 2010, pp. 130-131)

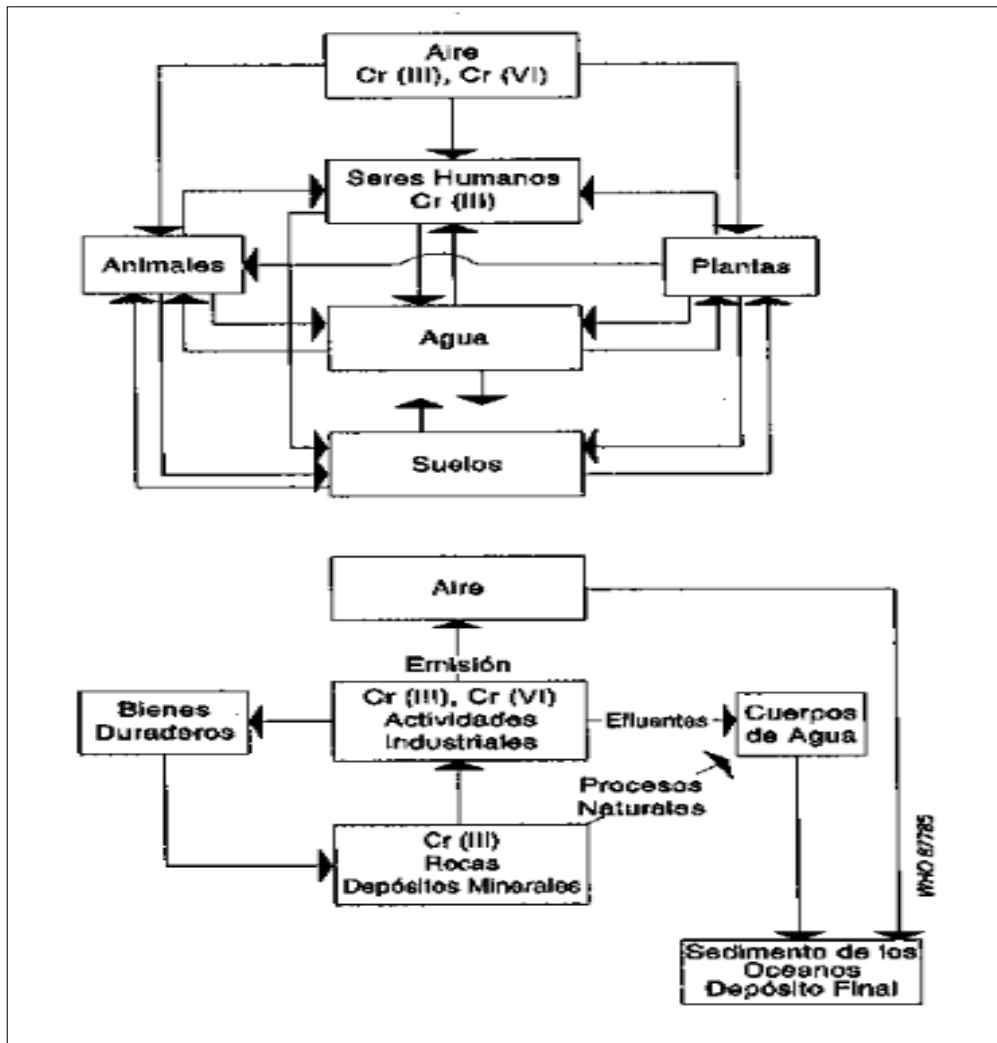
Para realizar el curtido son necesarios dos procesos:

- Proceso mecánico de post curtición: donde se proporciona un espesor específico e igual al cuero.
- Proceso húmedo de post curtición: El cuero es neutralizado, vuelto a curtir, teñido y engrasado.

Es necesario en esta etapa la energía eléctrica, agua, sales de cromo y sustancias químicas. Como resultado de esta actividad se genera aguas residuales y envases de productos químicos vacíos.

#### *2.2.2.4. Cromo en el ambiente y sus efectos*

El cromo trivalente es la forma más estable en la que se puede encontrar al metal. La mayoría del cromo en el ambiente se encuentra en este estado. Existe un ciclo completo que cumple el cromo el cual va desde las rocas o el suelo hacia las plantas, animales y personas y finalmente regresa al suelo (Figura 2-2). Es liberado al aire tanto por fuentes antropogénicas como medios naturales resultantes de los procesos de combustión e incendios forestales. Es posible encontrar al cromo en la atmósfera en forma de partículas. (Albert, 2002, pp. 229-231)



**Figura 2-2.** Ciclo ambiental del Cromo  
Fuente: (Albert, 2002)

Los efluentes procedentes de la industria son vertidos a las aguas superficiales, las cuales contienen cromo en distintas proporciones y estados oxidativos como el hexavalente. La posibilidad de que se mantenga hexavalente hasta llegar al mar se verá influenciada por la cantidad de materia orgánica presente en el agua.

El material particulado llega a disminuir el cromo (VI) y absorber el cromo (III), cuando existe una gran cantidad de materia orgánica. La reducción del cromo hexavalente a trivalente es acelerada en escenarios anaeróbicos, siendo condiciones típicas de las aguas freáticas mayormente profundas. Con el tiempo una gran cantidad de cromo termina siendo depositado en el sedimento.

En el suelo el cromo se encuentra como óxido insoluble con una movilidad baja, pero dependerá de las características de absorción que presente el suelo. Para plantas y animales vivos la mejor manera de absorber el cromo es en la forma hexavalente, pero ya absorbido es reducido el estado trivalente, siendo más estable. (Tiina Santonen, World Health Organization, 2009, pp. 87-89)

- Efectos del Cromo

Las afectaciones generadas por el cromo en el ambiente son un peligro constante y silencioso resultado de las actividades humanas, que corresponden al 70% del total de cromo existente en el medio (Tabla 5-2). Alteran la alcalinidad del suelo, siendo consecuencia del grado de concentración, pudiendo producir desertificación. Se contamina el suelo y acuíferos afectando de forma directa a la flora y fauna.

**Tabla 5-2:** Contribuciones al cromo ambiental

TIPO DE EMISIONES	PORCENTAJES DE CROMO EN EL AMBIENTE
Volcánicas	< 1%
Ciclos Biológicos	30%
• Absorción por las plantas	15%
• Intemperización por las rocas	15%
Fuentes antropogénicas	70%
• Producción minero-metalúrgica	3%
• Diversos usos	60%
• Procesos de combustión	7%

Fuente: (Albert, 2002) Toxicología Ambiental

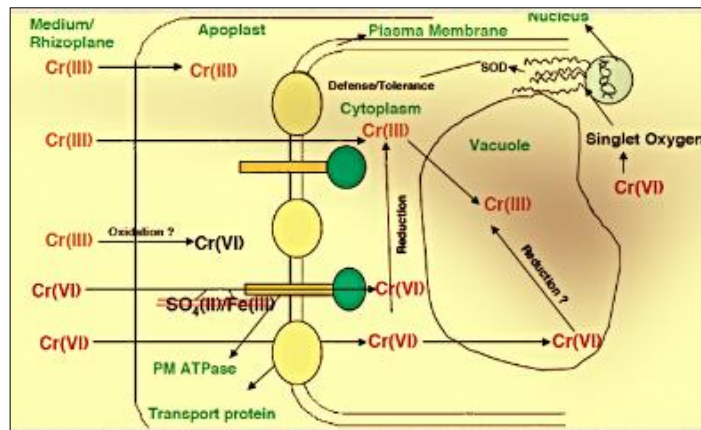
En los animales el cromo es altamente tóxico y puede producir complicaciones respiratorias, facilidad de adquirir enfermedades, defectos congénitos, infertilidad y formación de masas tumorales. Puede acumularse en altas concentraciones en las agallas de los peces que nadan cerca de los puntos de vertidos en relación a sus cuerpos que casi no acumulan. (Eróstegui, 2009, p. 45)

Para la salud humana el cromo hexavalente es el de mayor peligrosidad, ya que puede producir alergias y erupciones en la piel una vez que ha existido contacto. Mientras que por inhalación provoca complicaciones de salud bastante graves como: daños estomacales, alteraciones en el

sistema respiratorio, sistema inmunológico débil, cáncer y alteraciones en la genética. Pero la gravedad dependerá directamente de la concentración y el tiempo de exposición que se haya mantenido. El estado de oxidación +3 en el cromo interfiere en el metabolismo del azúcar y genera alteraciones cardiacas, en dosis relativamente bajas. (ECHA, 2009)

### 2.2.3. Absorción y transporte del cromo en las plantas

Ciertos metales y metaloides que no son esenciales para la planta son absorbidos, transportados y hasta acumulados por su particularidad electroquímica parecida a los nutrientes esenciales. La acumulación del metal dependerá de cómo se encuentre la solución en el suelo y pase a la raíz. El ingreso de metales pesados en las plantas esta asujeto a su presencia en el ambiente. Puede ser por causas naturales o antropogénicas. Dentro de las causas naturales se encuentra: actividad volcánica, tsunamis, formación de nuevos suelos, erosión, terremotos, etc. Como causas antropogénicas se tiene: minería, combustión de fósiles, actividad industrial, etc.



**Figura 3-2.** Modelo hipotético de transporte y toxicidad del cromo (VI) en plantas

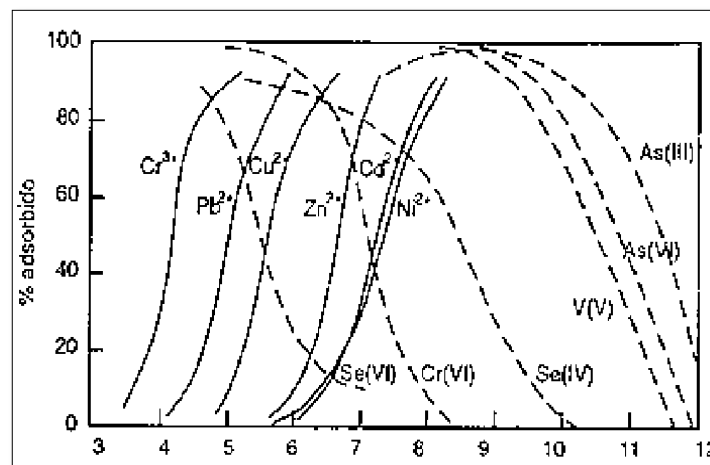
Fuente: (González, 2016)

El primer paso para que ingresen los metales pesados a la cadena alimenticia es por la absorción que lleva acabo en las plantas (Figura 3-2), esto ocurre cuando los iones inorgánicos y la sabia son transportados de la parte radicular hacia las hojas a través de células en forma tubular que corresponden al xilema (tejido leñoso).

A través de dos fuerzas, la primera se trata de ósmosis y la segunda corresponde a la fuerza de succión. Mientras que la ósmosis se produce por la diferencia de concentraciones en la parte superior e inferior de la planta. La fuerza de succión tiene por función absorber agua desde las

raíces y desplazarla hacia las hojas, cuando existe transpiración y es necesaria remplazar el agua perdida en este proceso natural. (Navarro-Aviñó et al., 2007, pp. 11-12)

El cromo se encuentra presente libre en el ambiente, pero no debe confundirse con su disponibilidad para las plantas, la cual es muy poca. Existe la presencia en suelos de residuos provenientes de curtiembres, que contienen cromo trivalente y hexavalente. Siendo este último el más biodisponible, pero menos estable en relación al trivalente. El pH es fundamental por ser quien designa el estado de oxidación al cromo en conjunto con los exudados radicales. Entre un pH de 5,5 y superior a 8 aumenta la solubilidad del cromo (VI). (James, 2002, p. 3)



**Figura 4-2.** Influencia del pH sobre la absorción de algunos metales, a diferentes pH

Fuente: (Kabata-Pendias, 2000)

#### 2.2.3.1. Fitotoxicidad

La toxicidad es causada por la falta de excreción en el organismo. Su peligrosidad aumenta por el paso en la cadena trófica donde forman parte en proporciones mayores los contaminantes. A este proceso se le otorga el nombre de biomagnificación, en el que muchas toxinas pueden producir alteraciones dentro de la célula. Como causa principal de la toxicidad de los metales pesados es que poseen una gran capacidad para unirse con moléculas orgánicas. Las uniones ligando-metal son dañinas para la célula ya que producen su destrucción, el desplazamiento de los elementos esenciales y la catálisis de reacciones o estrés oxidativo. (Navarro-Aviñó et al., 2007, pp. 12-13)

En la membrana celular de las plantas existen repercusiones por la presencia de los metales pesados como son: la oxidación de proteínas, inhibición de proteínas esenciales, alteraciones en los lípidos de la membrana y en la permeabilidad



El cromo es un metal tóxico, que puede producir daños en la planta que lo absorba. Las especies vegetales tienen diversas respuestas frente a estas manifestaciones de toxicidad, que varían según el reino y familia. La intensidad de los efectos está relacionada directamente con la concentración a la que se encuentre el metal. En las plantas aparecen lesiones en raíces, generadas principalmente por el cromo hexavalente.

Como efectos negativos causados por los metales pesados se puede manifestar:

- Inhibición en el crecimiento de la planta
- Daños estructurales (aparición de especies reactivas de oxígeno)
- Falta de estabilidad de las membranas celulares
- Efectos en la parte fisiológica y bioquímica (disminución en el contenido de clorofila, disminución del pH, cierre estomático, alteración en la fotosíntesis)

Mediante ensayos vasculares se ha evidenciado los efectos del cromo en la planta. (Iannacone y Gutiérrez, 1999, pp. 87-91) destacan la importancia de los bioensayos ecotoxicológicos, para establecer el riesgo ambiental que representan metales como plomo (Pb), mercurio (Hg) y cromo (Cr) pudiendo encontrarse alternativas de biorremediación que suplan las necesidades de recuperación que presenta el ambiente cuando ha sido contaminado.

#### 2.2.3.2. Resistencia

La respuesta de las plantas ante agentes tóxicos externos varía según el reino y la familia, donde es posible identificar claramente que las plantas vasculares son las más resistentes. Esta capacidad de tolerancia puede atribuirse a sus cualidades genéticas y fisiológicas. Siendo motivo suficiente por el cual la EPA (Agencia de Protección Ambiental) y la FDA (administración de Drogas y Alimentos) recomienden su estudio. (Hopkin, 1993, pp. 402-409)

Las plantas utilizan distintos métodos de protección frente a los metales pesados. Como una de las estrategias empleadas recurren a la exclusión del metal transfiriéndolo a la parte aérea. Otro de los métodos es acumular el metal a la parte aérea sin que esto cause ningún daño a la planta. El primer método (exclusión) corresponde a las especies sensibles y tolerantes a los metales pesados. Mientras que la acumulación es propia de las especies bioacumuladoras, resistentes a los contaminantes. (Prieto-Méndez et al., 2009, pp. 33-34)

Las especies vegetales también poseen otros mecanismos de defensa ante los metales pesados. Se conoce a nivel celular su capacidad para reducir el flujo de entrada del metal a través del control de transporte de la membrana (reparación celular). La planta puede producir un bombeo extracelular, para acelerar la expulsión del metal (biotransformación). Otra posibilidad es la de secuestrar el metal a través de la formación de complejos con iones (quelación).

- Biotransformación:

Proceso de reducción de la respuesta tóxica ante el contaminante, para minimizar la cantidad activa de la sustancia perjudicial en la planta. Se logra con el aumento de la polaridad que produce la dispersión del tóxico y así genera su expulsión rápidamente. En plantas, animales y eucariotas superiores, la transformación o degradación de compuestos tóxicos, se basa en una serie de rutas oxidativas, reductivas o hidrolíticas que cambian a nivel químico el compuesto y lo disponen para su eliminación por medio de cualquiera de sus vías excretoras (Castillo Rodríguez, 2005, pp. 509-511)

- Reparación Celular:

Mecanismo de respuestas ante los daños celulares como el estrés oxidativo. Colaboran activamente en las reparaciones de la pared celular y las alteraciones producidas en la copia de ADN en la cual intervienen las metalotioneínas y proteínas de choque térmico.

- Quelación:

Existen tres tipos de moléculas capaces de quelar al metal pesado. El glutatión, las fitoquelatinas y las metalotioneínas.

El glutatión: tripéptido que contiene cisteína. Puede unirse al metal y ser expulsado posteriormente, o disminuye el efecto de la producción de ROS (especies reactivas de oxígeno)

Las fitoquelatinas: oligopéptidos constituidos por la condensación de varias moléculas de glutatión. Evitan daños a la célula uniéndose al metal. Son las abundantes en relación al glutatión y las metalotioneínas

Las metalotioneínas: proteínas abundantes en cisteína. Se unen al metal pesado para luego expulsarlo al exterior, similar a proceso de las moléculas anteriores. (Navarro-Aviñó et al., 2007, pp. 18-22)

### 2.2.3.3. *Factor de Bioconcentración*

El Factor de Bioconcentración (FCB) es empleado para medir el nivel de captación que posee una planta tanto en la zona radicular y aérea, para con un metal. Existe varias formas de nombrarlo tales como índice de bioconcentración (FB) Coeficiente de absorción biológica (BAC), Coeficiente de transferencia (TC), Factor de concentración (Cf) o Coeficiente de bioacumulación (BAC). (Medina y Montano, 2014, p. 22)

En las plantas, el Factor de Bioconcentración es una medida de la eficiencia de acumulación de metales en biomasa, donde valores superiores a 1 señalan que las especies son potencialmente hiperacumuladoras (Audet y Charest, 2007, pp. 232-234) y las especies exclusoras son aquellas cuyo Factor de Bioconcentración es menor a 1. Se define como la relación existente entre la concentración del metal en la planta y el medio en el que se desarrolla sea este suelo a agua. (Álcoba, 2014, pp. 12-13) Donde se calcula así:

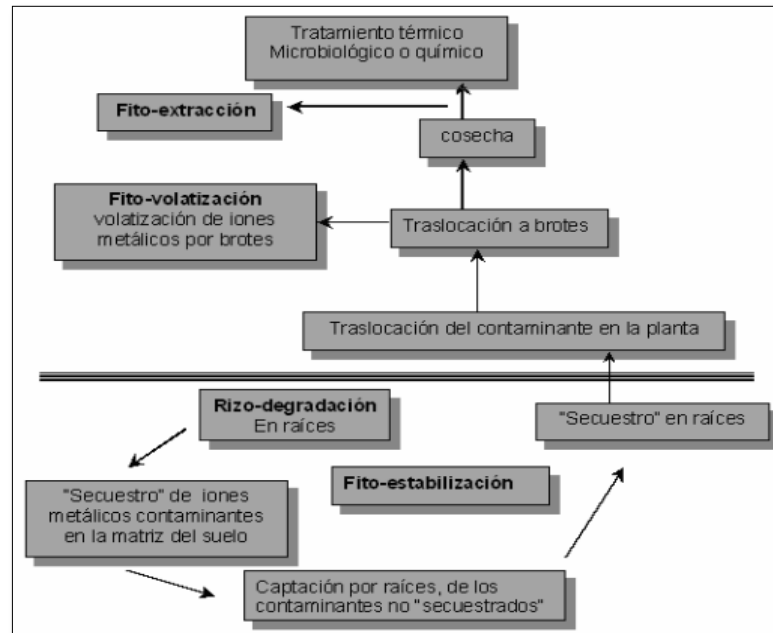
$$FCB = \frac{[metal]_{planta}}{[metal]_{suelo\ o\ agua}}$$

### 2.2.4. *Fitorremediación*

Existen diferentes tecnologías para tratar aguas con presencia de metales pesados. Conformadas por: adsorción, precipitación, intercambio iónico, extracción con solventes y electrodiálisis, que conllevan tiempo y elevados montos de inversión y son poco eficientes para tratar soluciones diluidas. Por tal razón se han desarrollado tecnologías suplementarias como biorremediación y fitorremediación, técnicas que emplean organismos vivos y sus derivados para la extracción de contaminantes (metales pesados) del agua. (Núñez-López. et al., 2009, pp. 18-19)

La Fitorremediación es una práctica que utiliza plantas para restaurar ambientes contaminados, sea en agua, suelo o aire. Es una técnica sustentable de costos accesibles. La Fitorremediación se realiza in situ, por lo que las plantas deben ser trasladadas o sembradas en el lugar afectado, a través de procesos bioquímicos que realizan y microorganismos presentes en su sistema radicular, pueden producir la reducción, mineralización, degradación, volatilización y estabilización de los contaminantes. (Núñez-López et al., 2004, pp. 69-71)

(Robinson et al., 1997, pp. 77-78) Indica que la utilización de especies vegetales que resisten a elevadas concentraciones de metales en suelo y agua posibilita la recuperación rápidamente con un leve impacto ambiental en relación a otras técnicas más agresivas que conllevan alteraciones posteriormente. En la Fitorremediación no solo debe considerarse la concentración existente del metal en el suelo, si no que de igual forma la tolerancia por parte de la planta.



**Figura 5-2.** Esquema general de la descomposición de iones metálicos en un proceso natural de fitorremediación

Fuente: (Singh et al., 2003)

La Fitorremediación puede aplicarse tanto en contaminantes orgánicos como en inorgánicos. No utiliza reactivos químicos peligrosos, ni altera la estructura del suelo. Como se mencionó anteriormente se realiza in situ para evitar elevados costos en el transporte. Es mucho más eficaz con la colaboración del mejoramiento genético, que aumenta la capacidad de las plantas para absorber contaminantes orgánicos y acumulación de metales pesados. Algunas especies vegetales se han modificado a nivel genético para resistir compuestos tóxicos específicos como cadmio, mercurio o bifenilos policlorados (PCB's). (Delgadillo-López et al, 2011)

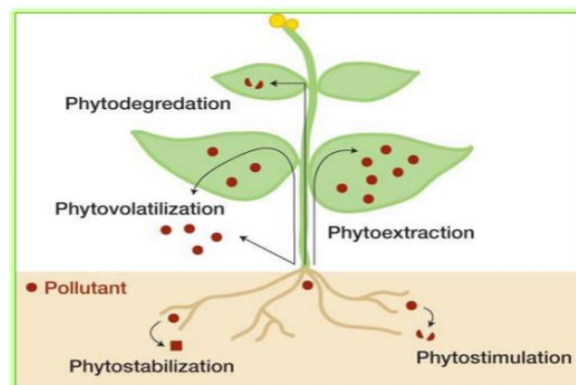
Para fitorremediar contaminantes orgánicos deben ser considerados varios aspectos:

- El metabolismo interior y exterior de la planta para con los contaminantes
- La completa degradación de los contaminantes (mineralización)
- Absorción de los contaminantes ( Reichenauer y Germida , 2008, pp. 710-712)

#### 2.2.4.1. Ventajas y desventajas de la fitorremediación

La Fitorremediación posee una serie de ventajas como su bajo costo. Esta técnica puede realizarse *in situ* y ser aplicada en suelo y agua. No requiere de conocimiento técnico extenso ya que las prácticas agronómicas aplicadas en la Fitorremediación son las básicas. Mejora las características físicas y químicas en medios sólidos y líquidos, proporciona cubierta vegetal. Puede aplicarse esta estrategia en grandes superficies.

Dentro de sus limitaciones destaca: la ubicación del contaminante (debe situarse cerca de la rizosfera de la planta, para que pueda darse su absorción). Pueden ser limitantes las condiciones físicas y químicas que presenta el medio para el desarrollo de las plantas (pH, salinidad, nutrientes). La concentración del contaminante (debe encontrarse en los límites de tolerancia para la planta) produce muchos problemas para la adaptabilidad y supervivencia de la vegetación. Otra problemática recae sobre la posibilidad de generar lixiviados de los contaminantes más móviles. Complejo acceso a las zonas afectadas para realizar el tratamiento. (Bernal, 2007, pp. 2-3)



**Figura 6-2.** Técnicas de Fitorremediación  
Fuente: (Benavides, 2016)

La Fitorremediación se ha implementado constantemente en los últimos años y su uso ha supuesto el aumento de nuevos conocimientos en los mecanismos de absorción, transporte y detoxificación por parte de las plantas. A través de la fitorremediación se puede recuperar medios contaminados por compuestos orgánicos e inorgánicos, pero faltan muchos procesos realizados por la planta por conocer como los mecanismos de transporte, interacciones entre la planta y los microorganismos, o la quelación a través de microorganismos orgánicos que deben ser estudiados a profundidad para potenciar el uso de las plantas en este método. (Llugany et al., 2007, pp. 6-7)

#### 2.2.4.2. Estrategias de la fitorremediación

- Fitodegradación o fitotransformación:

Consiste en utilizar plantas para degradar contaminantes de origen orgánico en sustancias de menor toxicidad, ejemplo: hidrocarburos aromáticos, hidrocarburos totales de petróleo (TPH), plaguicidas (herbicidas, fungicidas, insecticidas), surfactantes (detergentes), compuestos clorados. Mediante reacciones enzimáticas por medio de plantas y microorganismos que se encuentra en la zona de la rizosfera. La planta los secuestra en sus vacuolas para asemejarlos posteriormente y así descontaminar el ambiente.

- Fitoestimulación:

Este proceso trata de estimular el crecimiento de microorganismos a través de los exudados radiculares. Las capacidades fisiológicas y metabólicas de los microorganismos les atribuyen la posibilidad de degradar contaminantes orgánicos.

- Fitovolatilización.

Se trata de absorber, metabolizar y transportar los contaminantes desde el suelo o agua hacia la raíz y posterior pasarlo a la parte aérea de planta (hojas). Una vez allí los contaminantes son transpirados y se expulsan al ambiente (volatilizan), pero ya menos tóxicos en relación a su forma original

- Fitoestabilización:

Consiste en secuestrar, lignificar o humificar, empleando un tupido sistema de raíces que la planta desarrolla. Absorben la humedad del suelo debido a sus características hidráulicas. Las condiciones que establece la planta en el suelo con las necesarias para inmovilizar el contaminante (metales), quedando adherido a la rizosfera de la planta. Este proceso se efectúa por las diversas reacciones químicas, formación de complejos o mecanismos físicos como (adsorción).

- Fitoextracción o fitoacumulación:

Proceso en el cual las plantas acumulan contaminantes en sus raíces, tallo u hojas. A través de este mecanismo se extraen primordialmente metales pesados, pero también puede darse el caso de extraer contaminantes orgánicos e isótopos radiactivos.

- Rizofiltración:

Se trata de hacer crecer las raíces sumergidas en agua, raíces de plantas terrestres que tenga la capacidad de desarrollarse en un medio acuoso. Pueden las plantas absorber metales pesados de aguas residuales contaminadas. Con este mecanismo también se asocia la actividad microbiana en relación al sistema radicular de la planta. (Núñez-López et al., 2004, pp. 69-70)

#### 2.2.4.3. Rizofiltración

Técnica que emplea raíces de plantas para la descontaminación de agua ya sea superficial, subterránea o efluentes líquidos donde existan metales pesados, toxinas orgánicas u otros. Para llevar a cabo esta técnica las plantas deben ser cultivadas bajo invernadero, con sus raíces sumergidas en agua en lugar de tierra (Figura 7-2). Como se menciona anteriormente la raíz es el órgano de la planta que mantiene contacto directo con el metal o contaminante a ser tratado.



**Figura 7-2.** Raíz de lirio acuático en tratamiento de Pb (Rizofiltración)

Fuente: (Núñez-López et al., 2004)

Las plantas van absorbiendo el agua junto con los contaminantes, como bombas extractoras que purifican el agua. A medida que se van saturando las raíces de metales pesados deben ser cortadas. La rizofiltración también aporta belleza estética y es amigable con el medio ambiente, por lo que

es muy bien aceptada por las comunidades aledañas y los entes responsables de proteger los ecosistemas. (Guevara et al., 2009, p. 871)

Los sistemas en base a rizofiltración pueden remover de los medios acuosos fosfatos, nitratos, fenoles, pesticidas, metales pesados, elementos radiactivos, fluoruros, bacterias y virus, de aguas residuales de comunidades o ya sea agrícolas e industriales. Las principales descargas provienen de la industria lechera, curtiduría de pieles, aceitera y metalurgia. (Núñez-López et al., 2004, pp. 71-72)

Para llevar a cabo la rizofiltración es necesario seleccionar las mejores especies de planta para los metales presentes y las características de siembra. La biomasa resultante del proceso puede ser dispuesta al concluir el tratamiento, en rellenos sanitarios o usada como compost. Ambas posibilidades de disposición no son tan confiables por implicar el retorno del metal al medio ambiente a través de lixiviación natural siguiendo el ciclo primero en suelos, aguas superficiales o subterráneas, pasar a las plantas, animales y posterior al ser humano. (Núñez-López et al., 2009)

Este mecanismo de fitorremediación no se ha implementado a gran escala por la cantidad de residuo (biomasa) generado en el proceso. Este producto contaminado es el resultado de la transferencia tan solo del contaminante de una fase líquida a una sólida, sin disminuir su peligrosidad. Lo cual ha impedido su aplicación de forma amplia.

Pese a las limitaciones de la aplicación de la fitorremediación en grandes volúmenes, existen muchos casos donde sus resultados han sido satisfactorios. Países como la India, Ucrania, EE.UU, entre otros conforman la lista de quienes usan tecnología de vanguardia y aplican la rizofiltración como medida de descontaminación de efluentes afectados por compuestos que van desde metales pesados hasta residuos altamente radiactivos.

#### **2.2.5. Hidroponía**

La hidroponía es una técnica que se basa en sumergir las raicillas de las plantas en soluciones o sustratos (arena, tezontle, cascarilla de arroz o coco) en lugar de suelo agrícola. Este método requiere de la incorporación de una solución nutritiva, que aporte los minerales necesarios para el buen desarrollo de la planta. El cultivo hidropónico corresponde a una técnica revolucionaria, con grandes perspectivas a futuro, involucrando el uso de poco materiales y recursos. (Asociación Hidropónica Mexicana A. C., 2012, pp. 1-2)



Se aplica desde hace 2600 años atrás y como ejemplo destacan los jardines colgantes de Babilonia, contruidos por el rey Nabucodonosor I, así como también en Egipto y China. Pero la técnica fue admitida formalmente 1699 por Woodward. (Beltrano, 2015, pp. 11-14) Años después en 1860 los alemanes Sachs y Knop iniciaron el crecimiento de plantas en solución nutritiva. William F. Gricke, profesor de la Universidad de California, traduce a la hidroponía como "agua que trabaja". (Gilsanz, 2007, p. 9)

Pueblos asentados en las riveras, o bordes de lagos tienen por tradición realizar siembra sobre los pajonales que flotan en la superficie del agua. Tal es el caso de Titicaca en Perú, el Inle en Myanmar, que siembran jacintos de agua u otros sustratos de la localidad. (Beltrano, 2015, pp. 11-12) Las plantas cultivadas hidropónicamente de manera artesanal en lagos o montañas se ubican por encima del agua, con las raíces sumergidas receptando los nutrientes a través de una corriente dinámica que se produce naturalmente.

Las plantas absorben los nutrientes como iones disueltos en presencia de oxígeno ya sea en un medio sólido, líquido o gaseoso. Como objetivo la hidroponía incentiva el desarrollo de la planta controlando la calidad del agua, los minerales y el oxígeno disuelto en la solución nutritiva. Conforme la comida y el oxígeno son aprovechados deben ser repuestos de forma constante para asegurar el bienestar de la planta.

Cuando las plantas son sembradas en agua deben tener una oxigenación permanente. La forma correcta de proveer la oxigenación necesaria es por medio de movimiento o con aireación mecánica, donde no existe recirculación. Si no hay suficiente oxigenación en el agua la planta no se desarrollará rápidamente. Por lo contrario si existe saturación (de oxígeno), el incremento en el crecimiento será rápido. Es necesario aportar a la planta ciertos factores esenciales para su evolución como temperatura, humedad, intensidad lumínica, circulación de aire, etc.

Tan solo en las 6 últimas décadas ha adquirido importancia, mejorando gracias al análisis químico y llegando a considerarse como una esperanza para la humanidad. Este método de cultivo contribuye al aprovechamiento del espacio preservando la calidad del suelo. Los países menos desarrollados que se encuentran sobrepoblados podrán subsanar sus necesidades de alimentación, usando la hidroponía como alternativa de cultivo. (Isan, 2013, pp. 7-8) Siendo la hidroponía muy confiable es aplicada en todos los grandes centros de investigación, ya que ha posibilitado avances significativos en nutrición y disminución de contaminación.

Ventajas que brinda la hidroponía:

- Disminuyen los costos de producción.
- El espacio que involucra el cultivo es mucho menor (cuatro veces) en comparación al tradicional.
- El consumo de agua es menor.
- La presencia de parásitos, hongos y bacterias es baja.
- Mayor asepsia en el lugar del cultivo.
- No son tan afectados por los fenómenos meteorológicos en relación a los cultivos tradicionales.
- Recuperación de la inversión.
- Velocidad de crecimiento en los cultivos rápida.
- No es un problema utilizar agua con altas concentraciones de sal.
- El clima no es un impedimento para su ejecución.
- Por su bajo costo es competitivo en precio y calidad en el mercado.
- No son necesarios extensos conocimientos en agricultura, para su aplicación.
- La incorporación de nutrientes y aire es fácil y rápida.
- Ausencia de malas hierbas y plántulas invasoras
- No es necesario el uso de herbicidas, plaguicidas, fungicidas u otros.

#### 2.2.5.1. *Sistemas hidropónicos en sustrato*

Existen cultivos hidropónicos que utilizan sustratos inertes, que son rociados por sistemas de riego por goteo, subrrigación, o exudación. Se mencionan como los más utilizados a el cultivo en bancas o surcos, cultivo en saco, cultivo en contenedores individuales o canales y cultivo en superficies. (Novedades Agrícolas, 2016, pp. 3-5)

Los sustratos más comúnmente utilizados en estos sistemas son la perlita, la lana de roca, la fibra de coco y la turba. Los sustratos en el cultivo hidropónico cumplen varias funciones, de las cuales destacan la retención de la humedad, buena aireación y drenaje, sostén para la planta impidiendo su desestabilización y protección de las raíces de la luz del sol. (Hydroenvironment, 2008, pp. 2-4)

Propiedades del sustrato para un óptimo cultivo:

- Propiedades mecánicas: Los sustratos tienen la capacidad de mantener su estructura resistente durante un periodo extenso, donde no se altera su composición, no cambia de forma y no aumenta en su peso.
- Propiedades Físicas y químicas: Dentro de las propiedades físicas se menciona su capacidad de absorción de agua o químicos, su dimensión y peso. Por otra parte las propiedades químicas corresponden a su capacidad de repuesta al contacto con el sustrato o la solución nutritiva.
- Porosidad: Esta propiedad debe encontrarse en un porcentaje no menor del 80-85%. El grosor de los poros establece la aireación y la retención del flujo, ya que a mayor espacio mayor será la aireación, pero menor la retención del fluido. Cuando los poros son amplios la relación superficie/ volumen es menor.
- Granulometría: El tamaño de los gránulos diferencia la conducta del sustrato, ya que aparte de su densidad aparente cambia su comportamiento hídrico influenciado por la porosidad externa. A mayor granulometría mayor el tamaño del poro. Para semillas el tamaño idóneo es no más de 0,5 cm.
- Capacidad de retención y disponibilidad del agua: La tensión de humedad o capacidad de retención no es más que la presión ejercida por el sustrato sobre el agua, donde la humedad es menor cuando la fuerza por parte del sustrato aumenta.

#### 2.2.5.2. *Sistemas hidropónicos en medio líquido*

Este tipo de sistema hidropónico es exclusivo de un medio líquido, es decir que no necesita la presencia de un sustrato para brindar sostén a la planta.

- Hidroponía de flujo profundo (NGS):

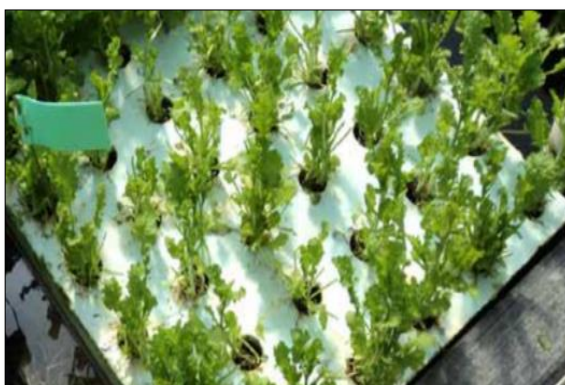
Sistema implementado en la década de los 80 por Jensen y Collins al igual que Massantini. Dicho método presenta gran potencial para ser ejecutado a gran escala. Trata sobre un tanque de plástico horizontal, donde la solución es recirculada y aireada constantemente. Este sistema contribuye a la buena recepción de la luz para las plantas, así como poco rozamiento para plantar y cosechar las especies vegetales. (OASIS, 2015, pp. 21-22)



**Figura 8-2.** Sistema de flujo profundo a gran escala  
**Fuente:** (OASIS, 2015)

- Sistemas flotantes:

Este sistema es el más rápido y fácil de realizar, conlleva bajos montos de inversión y no requiere el uso de energía adicional. Se trata de un contenedor donde se deposita la solución nutritiva y encima de este se ubica una plancha o lamina que sostiene a las plantas. Se debe suministrar aireación constante para evitar zonas muertas (agua estancada). El consumo de agua es alto en este sistema, siendo los cultivos que mejor se adaptan la lechuga, espinaca y plantas aromáticas. (Gilsanz, 2007, pp. 17-18)



**Figura 9-2.** Sistema flotante a base de espuma  
**Fuente:** (OASIS, 2015)

- Sistemas NFT (Nutrient Flow Technic):

La técnica hidropónica de Cultivo con Flujo Laminar de Nutrientes (NFT), surge en Inglaterra en la década de los años 60. El método es modificado en la Universidad de la Molina en Perú, donde se adaptan tubos de PVC con perforaciones para insertar las plantas. Para complementar se instala una bomba de acero inoxidable para succión de la solución nutritiva contenida en un tanque de almacenamiento. (Brenes y Jiménez, 2014, pp. 5-8)

Este sistema es conocido por su alto costo y una elevada cantidad de agua, por lo que el gasto de energía aumenta. Son cultivadas plantas de ciclo largo, que no pueden ser sembradas en otro tipo de sistema como el tomate morrón, melón, etc. Dentro de sus desventajas destacan la evaluación constante de pH y salinidad de la solución. (Gilsanz, 2007, pp. 19-20)



**Figura 10-2.** Sistema NFT en tubos de PVC  
Fuente: (Jiménez, 2010)

#### 2.2.5.3. *Solución nutritiva*

Los pioneros en utilizar nutrición vegetal fueron Aristóteles (384-322 A. C.) y Teofrasto (327-287 A. C.), seguidos por Dioscórides y posterior por Leonardo Da Vinci, (1452-1519) quien se unió a estas investigaciones. Pero el primer registro científico documentado sobre nutrición corresponde al belga Jan Baptista Van Helmont en 1600. Mientras que la primera publicación fue de sir Francis Bacon en *Sylva sylvarum* en 1627, con lo cual se empezó a utilizar esta técnica en diversas investigaciones. (Beltrano, 2015, pp. 14-15)

La solución nutritiva es la mezcla formada por agua y los nutrientes esenciales a las concentraciones exactas, que contribuyan al buen desarrollo de la planta. Los nutrientes deben ser sustituidos por sales o fertilizantes en la solución nutritiva que puedan suplir las necesidades de la planta impidiendo la aparición de alteraciones o deficiencias.

En la solución nutritiva se destacan varios aspectos que influyen directamente sobre la planta siendo: la relación mutua de los aniones y la relación mutua de los cationes, la concentración de los nutrientes que se manifiesta con el pH, la conductividad eléctrica (CE), la relación  $\text{NO}_3^-$  :  $\text{NH}_4^+$  y la temperatura. (Herrera, 1999, pp. 221-223)

Es importante tener establecida una dosis adecuada para evitar la acumulación de ciertos compuestos que contaminen la solución. Siendo preciso que las plantas reciban una solución nutritiva constituida por los 16 elementos esenciales. Encontrándose 9 de estos en una cantidad superior a 40 ppm, los denominados macronutrientes (Hidrógeno, Carbono, Oxígeno, Nitrógeno, Calcio, Fósforo, Magnesio, Potasio y Azufre). (Hernández, 2002, p. 1) Los micronutrientes son 8 en proporciones menores a 10 ppm (hierro, cloro, manganeso, molibdeno, boro, zinc, cobre y nickel). (Beltrano, 2015, p. 62)

No existe una solución nutritiva perfecta, ya que intervienen muchas variables ambientales en el medio, las cuales no pueden ser controladas completamente. Es fundamental que se realicen análisis del agua para tener conocimiento de varios aspectos como el pH, la conductividad eléctrica, carbonatos, nutrientes, elementos tóxicos y otros (Tabla). (Calderón, 2004, pp. 82-85)

Las variables que deben ser tomadas en cuenta para la formulación de la solución nutritiva son las siguientes:

- Especie y variedad de la planta
- Desarrollo de la planta
- Parte de la planta que se cosechará (raíz, tallo, hoja, fruto, flor)
- Época del año
- Temperatura, intensidad lumínica, hora. (Calderón, 2004, pp. 82-85)

En el mercado existen diversas soluciones nutritivas generales o tipo, pero aún no se ha creado una solución de rendimiento óptimo para los cultivos. Abonos de origen comercial hidropónicos minerales están perfectamente dosificados que no dejan en la planta ni residuos tóxicos ni metales pesados. Por tal razón queda a elección del agricultor utilizar el que más le convenga.

Las soluciones nutritivas tipo aplicadas a una temperatura entre 15 y 25 grados centígrados serán bien aceptadas por el cultivo. Si la temperatura sobrepasa o es menor a los valores antes mencionados generará deficiencia nutricional en las plantas. Es importante mencionar que la causa principal de problemas en la nutrición de la planta en un sistema hidropónico, es una solución nutritiva totalmente desequilibrada.

### 2.2.6. Características del género *Heliconia*

Las heliconias pertenecen a la familia heliconiaceae que son plantas monocotiledóneas, que producen brotes. Donde cada uno de estos brotes está conformado por un tallo llamado pseudotallo. Sus hojas están formadas por un pecíolo y una lámina, ubicadas en posición dística. El tipo de disposición es una forma de clasificarlas según su crecimiento, donde se destacan tres tipos.

- Musoide: las hojas están dispuestas verticalmente y con pecíolos muy largos, ejemplo: el banano
- Zingiberoide, hojas situadas a manera más o menos horizontal y pecíolos cortos.
- Canoide los pecíolos de las hojas tienen un tamaño mediano y se orientan oblicuamente.

Sus flores son hermafroditas es decir que cuentan con una parte masculina (estambres) y una femenina (pistilo). Estas flores pueden estar rectas, colgando o en péndulo con brácteas muy singulares que albergan en su interior unas diminutas flores. Las Heliconias pueden llegar a una altura de casi dos metros. Cuentan con una gran belleza. Son monocotiledóneas, de la familia musácea, (igual que el banano), y del género heliconia.

Estas flores son nativas del Centro y Sur América e islas del Pacífico Sur. La facilidad para cultivarlas y su belleza las han hecho favoritas para adornar jardines tropicales. También son flores de corte, en países donde no son cultivadas. En la actualidad el campo florícola de las heliconias se ha incrementado radicalmente con la incorporación de nuevas especies a la comercialización, siendo alrededor de 25 especies.

#### 2.2.6.1. Descripción botánica de la *Heliconia psittacorum* L. f.

Kress, Betancur y Echeverry describen a la *Heliconia psittacorum* de la siguiente manera:

*Planta de altura entre los 0,5 y 1,5 m. La H. psittacorum posee pecíolos que van desde los 11cm a los 32cm de largo, lámina de 0,37 -0,67 m de largo. Esta heliconia tiene una inflorescencia erecta de 8 a 18 cm de largo. Raquis flexuoso, de color anaranjado por lo general y glabro a glauco. Espatas dísticas, 3-7 por inflorescencia, rojo-naranjas por lo común, glaucas. Flores anaranjadas, rojas o amarillas con ápices verde oscuro, glabras y rectas a parabólicas. Fruto tipo drupa subglobosa de color amarillo. (Kress et al., 2004, p. 84)*

Son plantas finas y alargadas, de aproximadamente 30 cm de largo y 9 cm de ancho. Poseen una base oblicua delgada, con un color verde brillante. Su inflorescencia es sésil con alrededor 6 brácteas de color amarillo-naranja. Estas brácteas tienen terminaciones verdes de entre 3 y 6 cm de largo y 1cm de alto. Se considera que existe la presencia de alrededor de 15 brácteas de color amarillo. Los frutos que producen son de 5mm. (Otzoy et al., 2005, pp. 2-8)

Las flores que poseen una simetría bilateral son hermafroditas, con 3 pétalos (uno libre y dos unidos) y 3 pétalos fusionados. Sus estambres fértiles son 5 y 1 estaminoide contrario al sépalo libre. Los colibríes contribuyen a la polinización de las flores. Las *Heliconias psittacorum* L. f. pueden florecer todo el año, a diferencia de la mayoría de las especies de la familia heliconiaceae que presentan periodos de floración bien definidos.



**Figura 11-2.** Forma botánica de *Heliconia psittacorum* con la característica inflorescencia

Fuente: (Mazza, 2010).

Es utilizada en distintos lugares como parques, jardines como cuerpo aislado o para cubrir el suelo desnudo. En regiones de clima tropical y subtropical húmedo, bajo sombra o lugares abiertos las *Heliconias psittacorum* son sembradas ampliamente. Siendo capaces de adaptarse a distintos suelos o condiciones de cultivo. Su desarrollo es mucho mayor en lugares que presentan abundante materia orgánica, sin exposición al aire libre en épocas invernales, con temperaturas inferiores a los 15 °C. En verano los riegos deben ser recurrentes para evitar su posterior deshidratación. (Mazza, 2010)

Animales como ácaros o cochinillas atacan los cultivos de *H. psittacorum* provocando daño en flores, tallos y raíces. En invasiones masivas deben ser tratados los cultivos con rapidez para evitar pérdidas mayores. Las flores que han sido cortadas para adorno pueden resistir de 2 a 3 semanas con los cuidados necesarios.



#### 2.2.6.2. Taxonomía de la *Heliconia psittacorum* L. f.

El nombre botánico alternativo de la *Heliconia psittacorum* es *Heliconia cannoidea* A. Rich. Existe una amplia variedad de nombres comunes, donde destacan: Pico del loro, flor de loro, platanillo, pigüiriquí, cambur, bijao entre otros.

**Tabla 6-2:** Clasificación botánica del género *Heliconia psittacorum* L. f.

<b>Reino</b>	Plantae-Plantas
<b>Subreino</b>	Tracheobionta-Plantas vasculares
<b>Superdivisión</b>	Spermatophyta-Plantas de semillas
<b>División</b>	Magnoliophyta-Plantas a la Floración
<b>Clase</b>	Liliopsida-Monocotiledóneas
<b>Subclase</b>	Zingiberidae
<b>Orden</b>	Zingiberales
<b>Familia</b>	Heliconiaceae - Familia Heliconia
<b>Género</b>	Heliconia L. - Heliconia
<b>Especie</b>	Heliconia psittacorum L.f.

**Fuente:** (Goltra, 2003) National Tropical Botanical Garden

La *Heliconia psittacorum* es propia de la Amazonía, presenta flores que en realidad son hojas transformadas y llegan a tener una altura de hasta cuatro pies. Sus hojas son largas y algo puntiagudas de una tonalidad verde brillante. Sus brácteas de color rosado que provienen del tallo. Sus sépalos son de color crema con bandas verde-negro.

Pueden desarrollarse en lugares con mucha agua. La mayoría de las Heliconias habitan en zonas húmedas, pero también existen especies que pueden soportar zonas estacionalmente secas. Gran cantidad de especies pueden encontrarse en elevaciones medias, en bosques húmedos con niebla. Ciertas heliconias pueden ser avistadas a orillas de los ríos o en los bordes de las carreteras, o en zonas despejadas en la selva. (Peñarrieta et al., 2001, pp. 63-65)

### 2.2.6.3. *Manejo de cultivo para flores tropicales*

Son aplicables los siguientes métodos tanto para Heliconias y orquídeas de manera general.

- Suelo: Son adecuados aquellos que presentan abundancia de agua, ricos en materia orgánica, profundos y buena capacidad de drenado.
- pH: El rango óptimo va de entre 5 a 7 y la conductividad eléctrica no debe superar 2,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Nutrientes: Las flores requieren de nitrógeno y potasio en especial en su etapa de crecimiento. Por lo que se recomienda un análisis del medio en el que serán cultivadas (suelo o agua).
- Humedad: Lo más recomendable es que se encuentren entre un 70% - 95%. Es importante realizar aspersiones periódicas para mantener la humedad alta.
- Temperatura: No soportan temperaturas bajas por periodos extensos. (Peñarrieta et al., 2001, pp. 9-11)

### 2.2.7. **Norma legal que regula metales pesados**

#### 2.2.7.1. *Constitución Política de la República del Ecuador*

El respeto, protección y conservación de la naturaleza está respaldado por la constitución que promueve un desarrollo sustentable de la población en un entorno de equilibrio con el medio ambiente. Toda persona natural o jurídica tiene la potestad de exigir el cumplimiento de dicho derecho sustentado en los artículos vigentes donde se manifiesta que las infracciones realizadas serán debidamente castigadas. Es responsabilidad del estado incentivar el uso de tecnología limpia que contribuya con la preservación de los ecosistemas, donde se establezca incentivos económicos para quienes obtén por acciones ecológicas. (Asamblea Constituyente, 2008)

#### 2.2.7.2. *Ley de Gestión Ambiental*

La codificación de la Ley de Gestión Ambiental fue publicada en el Suplemento del Registro Oficial No. 418 el 10 de septiembre de 2004. Donde se instaura las bases y normas de política ambiental que describe las obligaciones, compromisos y responsabilidades por parte del sector público y privado en relación a la gestión del ambiente estableciendo los límites permisibles, vigilancias y sanciones en esta área. (Congreso Nacional, 2004)

### *2.2.7.3. Ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y aprovechamiento de agua*

La ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento de agua respaldada en los artículos 12, 313 y 318 en la Constitución de la República consagran el principio de que el agua es patrimonio nacional estratégico, de uso público, dominio inalienable, imprescriptible e inembargable del Estado y constituye un elemento vital para la naturaleza y para la existencia de los seres humanos, reservando para el Estado el derecho de administrar, regular, controlar y gestionar los sectores estratégicos, de conformidad con los principios de sostenibilidad ambiental, precaución, prevención y eficiencia (Asamblea Constituyente, 2014)

### *2.2.7.4. Código Orgánico del Ambiente*

Este código tiene como finalidad brindar garantías de derecho a las personas a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*. Las disposiciones de este Código regularán los derechos, deberes y garantías ambientales contenidos en la Constitución, así como los instrumentos que fortalecen su ejercicio, los que deberán asegurar la sostenibilidad, conservación, protección y restauración del ambiente, sin perjuicio de lo que establezcan otras leyes sobre la materia que garanticen los mismos fines. (Asamblea Constituyente, 2017)

### *2.2.7.5. Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente*

El Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente, Decreto ejecutivo 3399 en el libro VI- anexo I de la Calidad Ambiental corresponde a una norma técnica ambiental que establece límites permisibles, disposiciones y prohibiciones para descargas en cuerpos de aguas o alcantarillado, al igual que criterios de calidad de las aguas en sus diferentes usos. Esta normativa ecuatoriana tiene como finalidad prevenir y controlar la contaminación ambiental con el objetivo principal de proteger la calidad del recurso agua para salvaguardar y preservar la integridad de las personas, de los ecosistemas y sus interrelaciones y del ambiente en general. (Ministerio del Ambiente, 2007)

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO Y EXPERIMENTAL

#### 3.1. Tipo y diseño de la investigación

##### 3.1.1. *Tipo de investigación*

Consiste en una investigación experimental, donde se manipula una variable y se controla a las demás. Este tipo de investigación brinda información causa- efecto de la actividad llevada a cabo por el investigador con la finalidad de realizar comparaciones para así predecir fenómenos, aceptar o rechazar una hipótesis y/o sugerir propuestas. En conclusión corresponde al desarrollo de un plan o estrategia que detalla las acciones y medios de control que se efectuaron para alcanzar los objetivos del experimento.

El tipo de investigación realizado también es orden correlacional ya que el estudio tuvo como finalidad determinar el grado de relación o asociación existente entre dos o más variables. Se caracterizó por medir primero las variables y luego mediante pruebas de hipótesis correlacionales y la aplicación de técnicas estadísticas, se estimó la correlación.

##### 3.1.2. *Diseño de investigación experimental*

En el estudio se tomaron en cuenta diversos parámetros, que fueron analizadas minuciosamente. Bajo condiciones estrictas fue posible observar el comportamiento del experimento, en control de las variables, minimizando el error y la participación de posibles agentes externos que puedan alterar los resultados obtenidos.

Se empleó el diseño completamente al azar (DCA) ya que el objetivo es determinar si existe una diferencia significativa entre los tratamientos conformado por: Una especie vegetal y Tres

concentraciones. Para separar medias cuando sean significativas Se utilizó la prueba de TUKEY al 5%.

**Tabla 7-3:** Análisis de Varianza (ANOVA).

Fuente de variación	Grado de libertad
Dosis	2
Error	6
Total	8

Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

**Tabla 8-3:** Diseño completamente al azar (DCA).

Planta (H)	Concentraciones (A, B, C)	Recipiente (R)
<b>1</b>	3	3
<i>Heliconia psittacorum</i> (heliconiaceae)	A (10 mg/l)	R1 (recipiente 1) R2 (recipiente 2) R3 (recipiente 3)
	B (20 mg/l)	R1 (recipiente 1) R2 (recipiente 2) R3 (recipiente 3)
	C (30 mg/l)	R1 (recipiente 1) R2 (recipiente 2) R3 (recipiente 3)

Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

### 3.1.3. Unidad de análisis

En la presente investigación se tuvo como unidades de análisis al efluente: agua contaminada artificialmente con cromo (VI) y a la especie vegetal: *Heliconia psittacorum* (heliconiaceae).

### 3.1.4. Población de estudio

La población de estudio corresponde a los litros (L) de agua con presencia de cromo (VI) y a las muestras de plantas de *Heliconia psittacorum*.

### **3.1.5. *Tamaño de la muestra***

Muestra constituida por 450 L de agua contaminada y 45 muestras de plantas de *Heliconia psittacorum*

### **3.1.6. *Técnica de recolección de datos***

Con la técnica de recolección de datos se facilitó la selección de la muestra aleatoria. La investigación, así como su metodología se sustentaron en información bibliográfica de experimentos ya realizados encontrados en artículos y tesis representativas de temas relacionados.

## **3.2. *Parte experimental***

Se diseñó y construyó un invernadero tipo túnel de 35 m<sup>2</sup> y un sistema de cultivo hidropónico en las inmediaciones de la Facultad De Recursos Naturales de la ESPOCH. Consecuentemente se procedió a una fase de adaptación de la especie vegetal a las condiciones controladas de humedad relativa y temperatura al interior del invernadero para posterior dar lugar a la fitorremediación de las aguas contaminadas con cromo (VI). Tanto la descripción de su ejecución en campo, así como los análisis realizados en laboratorio y el respaldo bibliográfico se detalla a continuación.

### **3.2.1. *Lugar de desarrollo de la investigación***

- Lugar de recolección de plantas

Las plantas fueron recolectadas en el complejo turístico “Lago Verde” que está ubicado en la vía Pucuna a 30 minutos del cantón Joya de los Sachas, perteneciente a la provincia de Orellana. Cuenta con un bosque de exuberante vegetación y gran variedad de Heliconias y otras especies ornamentales de gran belleza paisajística.

- Lugar de recolección de datos

La investigación realizada se llevó a cabo en un invernadero de 35 m<sup>2</sup> construido en las inmediaciones de la Facultad de Recursos Naturales de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ubicada en la Panamericana Sur, kilómetro 1 ½.

### **3.2.2. *Periodo experimental***

El presente estudio dio inicio a su fase experimental en el mes de diciembre del 2016 y culminó en el mes de febrero del 2017, con una duración de tres meses.

### **3.2.3. *Especie vegetal sujeta a investigación***

A través de una ardua recopilación de información que ayudó a la identificación de especies vegetales con propiedades para remover metales en agua, se ultimó lo siguiente.

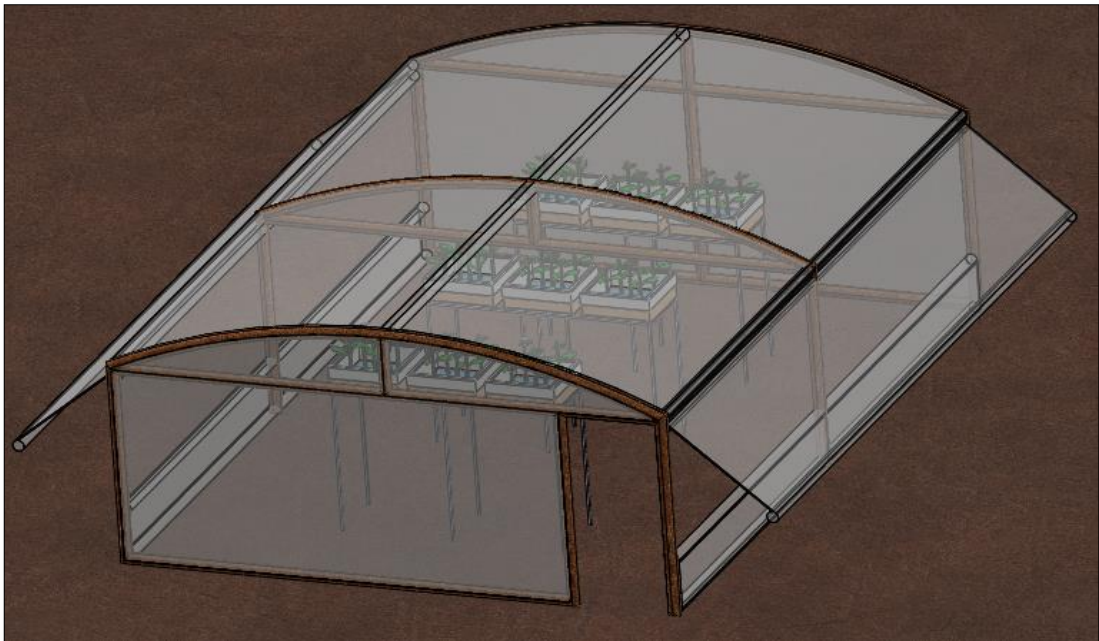
La *Heliconia psittacorum* es una especie vegetal que presenta cierta tolerancia a una extensa gama de condiciones ambientales, lo que la hace una especie llamativa para ser utilizada en tratamientos de aguas con presencia de Cr (VI) mediante un sistema de cultivo hidropónico. Las características de las plantas usadas para investigación fueron:

- El tallo de las plantas se encontraba entre los 30-50 cm de longitud, lo que mostraba su madurez y desarrollado respectivo para la etapa inicial en la que se hallaba la planta.
- Las raíces tenían una longitud de hasta 10 cm dotadas de sus pelos radiculares.
- El estado anatómico era adecuado con un crecimiento recto y el grosor del tallo el respectivo.
- Las plantas poseían pocas hojas y algunas sin hojas pero con presencia de brotes, de buen estado y de un color verde vivo, sin necrosis.
- Sin plagas presentes en las plantas.

### 3.2.4. *Diseño y construcción del invernadero y sistema hidropónico*

#### 3.2.4.1. *Invernadero*

El invernadero es una instalación que debe cumplir una serie de requerimientos necesarios para desempeñar sus funciones apropiadamente. Las condiciones mayormente exigidas son: iluminación, un calentamiento rápido, efecto invernadero, buena ventilación, impermeabilidad, resistencia a los agente atmosféricos, economía y mecanización fácil. (Serrano Cermeño, 2005, pp. 51-62)



**Gráfico 1-3.** Modelo del Invernadero tipo túnel construido en las inmediaciones de la ESPOCH

**Fuente:** Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

#### a. *Materiales empleados*

- Cimientos: pingos redondos de madera (eucalipto), alambre.
- Estructura superior: arcos de metal , pingos, alambre, pegamento resistente al agua, pernos de  $\frac{1}{4} \times 3$
- Cubierta: plástico israelita,
- Cortinas: plástico israelita, tubos metálicos, alambre
- Abastecimiento de agua: manguera, válvula de  $\frac{1}{2}$  , PVC, alambre, madera



- Conexión eléctrica: cable sólido N° 10, enchufe, alambre

b. *Proceso de construcción*

Se construyó un invernadero tipo túnel de 35m<sup>2</sup> (5m de ancho, 7 m de largo y 2.55 m de alto) con base de pingos de madera, arcos de metal y plástico israelita en las inmediaciones de la Facultad de Recursos Naturales en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Anexo A), para el estudio de la *Heliconia psittacorum*.

Los invernaderos tipo túnel se caracterizan por no ser tan complejos a la hora de su construcción y utilizar materiales de bajos costos como postes y pingos de madera que se encuentran en la zona.

- Para los cimientos se utilizaron 6 pingos de madera de 1.80 m y 2 pingos de 2.55 m separados a lo ancho por 2.5 m y a lo largo por 3.5m. Ubicando a los pingos más altos en el centro anterior y posterior del invernadero para así poder dar soporte a los arcos. A nivel superior se colocó 3 pingos de 5 m de largo en sentido transversal que fueron sujetados con alambre.
- Los 3 arcos de metal presentaban un 40 % de caída y se inmovilizaron con alambre por encima de los pingos colocados en dirección horizontal brindando la forma de túnel al invernadero y se cubrieron con plástico de origen israelita calibre número 8 de doble capa para impermeabilizar.
- Se extendió alambre alrededor de los laterales de la estructura a una altura de 0.50 m del suelo y en la parte inferior con la finalidad de formar los faldones y dejar un espacio libre para la entrada de aire, sujetando firmemente el plástico de calibre número 6 al alambre para impedir que el viento lo arranque. Las paredes anterior y posterior se forraron con plástico de invernadero de calibre número 8 de un solo corte.
- La puerta para el ingreso se colocó en la parte frontal del invernadero de lado derecho y su estructura era de tubos livianos de metal para disminuir su peso y evitar que se desplace, siendo asegurada con tornillos a los pingos y también cubierta por plástico de invernadero.

c. *Adecuación*

El invernadero debía cumplir con una serie de parámetros, para que la especie vegetal *H. psittacorum* se desarrolle naturalmente en un ambiente diseñado para su prosperidad. Esto implicaba proporcionar la sombra necesaria, la humedad relativa adecuada similar a los trópicos de donde es endémica la planta y la corrección de la temperatura en el interior del invernadero.

Una vez construido el invernadero la luz que ingresaba era muy fuerte, no apta para la planta que se alojaría siendo preciso la aplicación de malla sarán al 70 % por encima de los pingos ubicados horizontalmente, la cual se extendió y aseguró con cuerdas. Este porcentaje en la malla hace referencia a la cantidad de luz que es filtrada al interior. Cuando hablamos de malla sarán al 70% nos indica que retiene el 70 % de luz y el restante 30% a traviesa este filtro.

Después de colocar la malla sarán persistía la intensidad lumínica al interior del invernadero por lo que fue necesario colocar una segunda cobertura de tela negra “Mega liso” cuyas características es ser muy delgada, elástica y con un costo accesible. Tres cortes de 2x3m se requirieron para cubrir la sección media interior del invernadero e impedir el paso de luz, generando así el ambiente idóneo para el crecimiento de las plantas.

- Corrección de la temperatura al interior del invernadero.

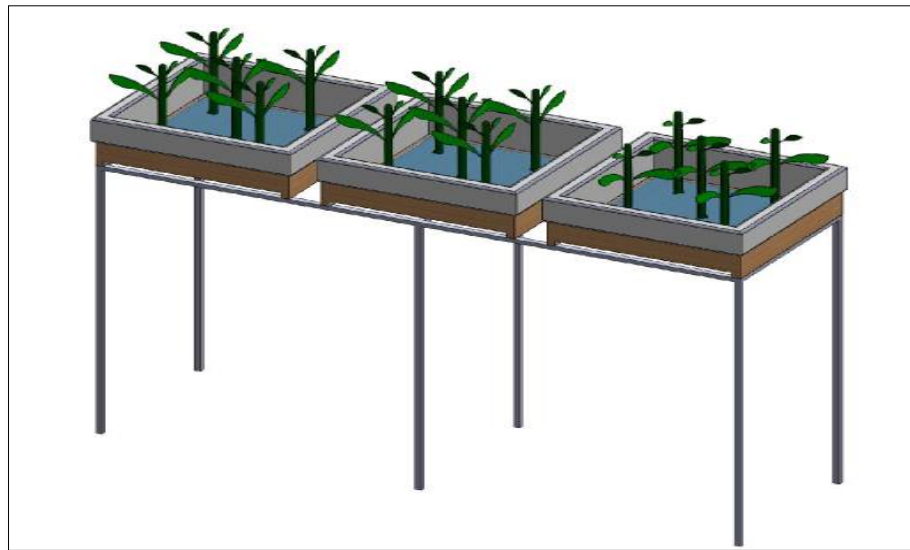
El diseño inicial para la entrada de aire en el invernadero proyectaba temperaturas superiores a los 38 °C. Dichas temperaturas se encontraban por encima de las requeridas por la planta, que van de entre los 21 °C hasta los 35 °C lo que implicó rediseñar la entrada de aire en el invernadero. La medida adoptada se menciona a continuación.

En ambos lados del invernadero se retiró el plástico que estaba fijo a los pingos y se colocó de nuevo con forma de cortina, en cuyo extremo inferior estaba adherido un tubo de metal (de 1 pulgada de diámetro y 3 mm de espesor) galvanizado dotado con manubrios (Anexo B). Esta modificación permitió el desplazamiento ascendente y descendente de la cortina de forma fácil y rápida en la totalidad de la franja horizontal de 7 m y no tan solo en la franja central como estaba en el diseño inicial, asegurando una correcta aireación y manipulación de la temperatura interior.

### 3.2.4.2. Sistema hidropónico

El sistema flotante de raíz a base de espuma es el más rápido y fácil de realizar ya que conlleva bajos montos de inversión y no requiere el uso de energía adicional. Se trata de un recipiente o contenedor donde se deposita la solución nutritiva y encima de este se ubica una plancha o lamina que sostiene a las plantas. Donde se debe suministrar aireación constante para evitar zonas muertas (agua estancada). (Gilsanz, 2007, pp. 17-18)

El diseño de raíz flotante fue el seleccionado para el cultivo hidropónico de la *Heliconia psittacorum* por los aspectos positivos que se mencionan anteriormente. Se tomaron en cuenta varios parámetros para la construcción como: el volumen del agua, número de repeticiones, tamaño del invernadero y la temperatura al interior del invernadero.



**Gráfico 2-3.** Modelo del sistema de cultivo Hidropónico de *Heliconia psittacorum* construido en la ESPOCH

**Fuente:** Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

#### a. Materiales empleados

- Soportes: Tubos de metal (de  $\frac{3}{4}$  x 6).
- Estructura superior (contenedores): madera de eucalipto, clavos.
- Recubrimiento: plástico israelita N° 6, pegamento resistente al agua, alambre
- Cubierta: Espuma Flex de 5cm de grosor

**b.**            *Proceso de construcción*

- Los recipientes se elaboraron con madera de eucalipto y las dimensiones establecidas para la construcción fueron de 0,60 m de largo, 0,60 de ancho y 0,20 de profundidad (Anexo C). Donde fue posible albergar un volumen de 50 L por cada una de los 9 recipientes para el experimento. La profundidad del recipiente se estableció conforme a las necesidades hídricas de la especie *Heliconia psittacorum*.
- El largo y ancho fue diseñado para albergar a 5 plantas de la especie *H. psittacorum* que presentaban un sistema radicular de entre 10-15 cm de longitud extendiéndose lateralmente, por lo que se diseñó un sistema de recipientes para cultivo hidropónico de forma cuadrada. Recubiertos por una doble capa de plástico de invernadero número 6 los contenedores fueron impermeabilizadas (Apartado 2.2.5).
- Los 3 soportes de metal tuvieron 2 m de longitud, 1,30 de alto y 0,60 m de ancho donde se instalaron 3 recipientes por soporte, cumpliendo el diseño experimental planteado para la investigación
- Para la cubierta de las camas hidropónicas y por tratarse de un cultivo de raíz flotante se utilizó espuma Flex de 0,60m de ancho, 0,60m de largo y 5 cm de grosor. A cada una de las 9 cubiertas de espuma Flex se le realizaron 5 perforaciones separadas a 0,30m de longitud para la incrustación de las plantas permitiendo su normal desarrollo radicular en su etapa inicial de crecimiento (Anexo D).

**3.2.5.**        *Preparación de los medios físicos*

- Preparación de los recipientes para cultivo hidropónico

Se limpió minuciosamente los 9 recipientes con agua para regadío del reservorio de la Facultad de Recursos Naturales, con lo que se eliminó cualquier agente externo que pudiese interferir con el experimento. Para confirmar la funcionalidad de las camas se llevó a cabo una prueba de impermeabilidad para constatar que no hubiese fuga de agua en los recipientes, donde se dejó a las camas durante 24 horas con agua dando como resultado un correcto aislamiento del líquido.

- Transporte y preparación de la especie vegetal

Las plantas fueron extraídas del complejo Turístico Lago Verde (Apartado 2.2.1.) donde se lavaron para retirar el exceso de tierra. Los rizomas de las plantas permanecieron intactos, sin cortes ni modificaciones. En fundas de 7 lb se ubicaron 5 plantas hidratadas (sumergidas a nivel del sistema radicular) con agua de llave y solución nutritiva hasta completar las 45 plantas de la especie *H. psittacorum* para su posterior transporte a la ciudad de Riobamba.

Una vez llegadas a la ciudad establecida, las plantas fueron trasladadas al invernadero previamente construido (Apartado 2.2.4.1.). Lugar en el que se les retiró de las fundas y se colocaron en un recipiente plástico durante 2 días con la solución que habían sido transportadas, para luego ser lavadas con agua de regadío previo a su cultivo en sistema hidropónico.

### **3.2.6. Siembra y adaptación de la especie vegetal al cultivo hidropónico**

Cada planta fue incrustada en los orificios desde abajo hacia arriba de la lámina de espuma Flex por facilidad y preservación de la integridad de la planta, ya que el diámetro y longitud de las raíces no permitía sembrarlas desde la parte superior. Para evitar que se muevan y conserven una posición recta se colocó espuma de 3 cm de ancho y 3 cm de alto alrededor del tallo en cada orificio

Las raíces se encontraban en contacto con el agua mientras que el tallo y hojas estaban suspendidos por las láminas y las espumas que los sujetaban firmemente. La capa de espuma Flex servía como cobertor para impedir el paso de la luz a las camas y por ende la generación de algas verdes en el medio (Anexo E).

- Fase de adaptación de la *H. psittacorum* al cultivo hidropónico

La fase de adaptación de las plantas a las condiciones ambientales controladas en el interior del invernadero se realizó por 30 días (Anexo F). Las plantas fueron sembradas en agua de regadío del reservorio de la Facultad de Recursos Naturales de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, con solución nutritiva aplicada al inicio y al final de dicha fase, aireación permanente y sin la presencia de cromo (VI).

### 3.2.7. Preparación del medio líquido

Para la preparación de muestras se utilizó dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) al 99.9 % de pureza y como efluente líquido el agua para regadío (Apartado 2.2.6.). Se trabajó con valores de 1.41, 2.83 y 4.24 g/L con la finalidad de obtener valores de Cromo (VI) similares a los efluentes de curtiembre, las concentraciones obtenidas fueron 10, 20 y 30 mg/L.

Las muestras fueron preparadas directamente en las camas hidropónicas a través de una mezcla homogénea, dando una tonalidad amarilla al efluente (Anexo G).

Para la determinación de los valores se usó:

Ecuación 1-3:

$$l * \frac{gr Cr^{6+}}{l} * \frac{gr K_2Cr_2O_7}{2(gr Cr^{6+})} = gr K_2Cr_2O_7$$

### 3.2.8. Solución nutritiva

La *H. psittacorum* responde de manera positiva a los aportes generosos de nitrógeno (N). Siendo el equilibrio de 3N-1P-2K el que proporciona mejor beneficio a su correcto desarrollo través de abonos de lenta liberación al momento de la plantación.

Se aplicó la solución nutritiva con nombre comercial ABOREC PLUS. Nutriente a base de péptidos que fortalece y protege a la planta de enfermedades por ser totalmente orgánico y estar constituido por macronutrientes y micronutrientes, microorganismos benéficos y fitohormonas. A continuación se detalla su composición.

**Tabla 9-3:** Composición de ABOREC PLUS

ELEMENTOS MAYORES	CONTENIDO
Nitrógeno	3,26 %
Fósforo	50 ppm
Potasio	1,30 %

Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

**Tabla 10-3:** Contenido en Kg de muestra (ABOREC PLUS)

MICRONUTRIENTES	CONTENIDO (mg)
Fe	63,46
Cu	0,56
Ca	422
Mg	279
Zn	4,78
Na	36,15
SiO <sub>4</sub> .nH <sub>2</sub> O	0,6

Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

- Aplicación al medio de cultivo hidropónico

Los nutrientes son mejor aprovechados en un medio líquido, sin la intervención de sustratos o medio sólidos, por tal razón el volumen aplicado a las camas se daba en un periodo de tiempo considerable para evitar la sobre saturación de nutrientes y así su estancamiento en los recipientes.

La solución nutritiva fue aplicada al inicio del experimento y a partir de dicha fecha cada 30 días hasta culminar la fase experimental. Se destinó 3 ml de la solución nutritiva ABOREC PLUS por cada litro de muestra en cada tratamiento (recipiente de cultivo hidropónico). Por encontrarse la solución nutritiva concentrada y ser un medio líquido el de siembra para las plantas con un volumen experimental conocido, su aplicación se dio sin diluciones.

### 3.2.9. Aireación

Cuando la presencia de oxígeno disminuye se reduce drásticamente la absorción de agua y minerales por parte de la planta con consecuencias que se ven reflejadas en el sistema aéreo y radicular. Los iones de la solución son mejor absorbidos por raíces saludables, que realizan este procedimiento con la energía metabólica proporcionada por la respiración radicular. (Fernández, 2013, pp. 10-12)

Se utilizó aireadores de marca comercial JAD, modelo Air Pump Sc-3500 por ser bombas de aire de caucho compuesto, de polímero de alta calidad, bajo nivel de ruido, una gran capacidad de aire, no requiere de aplicación de aceite, con gran eficiencia y bajo consumo de energía. A continuación se mencionan sus características:

**Tabla 11-3:** Características del aireador JAD, modelo Air Pump Sc-3500

Voltios	AC230 / 115 / 12V
Frecuencia	50 / 60 Hz
Potencia	2.5 W
Presión	0.012 MPa
Salida	3.2 L / min
Peso	0.20 kg
Tamaño	(75 x 50 x 120) mm

Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

- Aplicación al medio de cultivo hidropónico

Para satisfacer las necesidades metabólicas de la planta fue necesario la aplicación de aireación permanente a cada uno de los recipientes, ya que la ausencia de recirculación en el tratamiento significaba la generación de un sistema anaeróbico no deseado y perjudicial para la especie vegetal.

Tres bombas aireadoras de la marca JAD, modelo Air Pump Sc-3500 (utilizadas en acuarios) fueron necesarias para brindar aireación permanente a los cultivos hidropónicos. Cada bomba disponía de una llave de paso para tres conexiones adicionales de mangueras por las cuales se brindaba el aire requerido a los 9 recipientes (Anexo H).



### 3.2.10. Cambios aparentes en la planta

El vigor en una planta se traduce como las características externas en presencia de un medio determinado, donde cumplen las funciones que les corresponde. En ocasiones las especies vegetales se ven afectadas por condiciones ambientales o contaminantes presentes en lugar que se desarrollan.

Siendo de suma importancia conocer la capacidad de respuesta por parte de la *Heliconia psittacorum* ante tales alteraciones y los cambios sufridos frente a los cultivos hidropónicos que contienen cromo (VI). Se registró a través de método cualitativo continuo la vigorosidad de la planta y la presencia de necrosis (Anexo I). En la Tabla 12-3 se detalla lo antes descrito.

**Tabla 12-3:** Monitoreo de los cambios aparentes en la especie vegetal.

Monitoreo	Frecuencia	Criterio	Estado	Valor de referencia
Final	Al finalizar la etapa experimental ( a los 60 días)	Vigorosidad	Muy vigorosa	4
			Vigorosa	3
			Medianamente vigorosa	2
			Débil	1
		Necrosis	Existe	1
			No existe	0

Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

Mientras que la longitud del tallo y el conteo de raíces nuevas (Anexo J) se efectuaron en dos ocasiones al inicio del estudio y a su culminación para establecer si la especie vegetal tuvo capacidad adaptativa a medios de cultivos puramente en agua con presencia de cromo hexavalente.

**Tabla 13-3:** Monitoreo del tamaño de la planta y raicillas nuevas

Monitoreo	Frecuencia (días)	Variable	Materiales
<b>Inicial</b>	1	Longitud del tallo Raíces nuevas	Regla (1m) -
<b>Final</b>	60	Longitud del tallo Raíces nuevas	Regla (1m) -

Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

*3.2.10.1. Análisis probit sobre la influencia de cromo (VI) en el vigor de Heliconia psittacorum*

El análisis probit se encarga de la relación entre la intensidad de un estímulo y la respuesta que se presenta frente a dicho estímulo. Se utiliza en casos donde se dispone de una respuesta dicotómica donde puede estar bajo la influencia de una o varias independientes y es óptima para datos experimentales. Se determinó la DL50, que es la dosis letal para matar al 50 % de la población vegetal sujeta a investigación y estableció la concentración que causa su deceso a través del programa Statgraphics centurión XVI.

*3.2.11. Variables de control en el interior del invernadero*

- Temperatura

Las heliconias pueden llegar a vivir en lugares con climas fríos, aunque la temperatura mínima recomendada en los procesos de propagación es de 14 °C ya que normalmente la mayoría de las especies son de climas templados y cálidos. Pero el clima idóneo para la *H. psittacorum* será en el cual la temperatura varía entre una mínima de 21 °C y una máxima de 35°C. (Jerez, 2007, pp. 31-33)

La temperatura es el mayor factor limitante del cultivo de *H. psittacorum*, ya que por debajo de los 10°C, las plantas dejan de crecer, mientras que los rizomas pueden sobrevivir hasta los 1-2°C. Las bajas temperaturas, no la altitud, son las causantes de los principales problemas en plantas que se cultivan a altitudes mayores que las naturales.

- Humedad relativa

Las heliconias se desarrollan de mejor forma con humedad relativa del 70 % o más, por lo que el riego por aspersión es conveniente para el cultivo brindando la humedad necesaria al ambiente. Pero el exceso de humedad puede ser perjudicial ya que permite la proliferación de hongos e insectos.

### 3.2.11.1. *Monitoreo y control de temperatura y humedad relativa*

En la etapa de experimentación de 60 días se llevó a cabo el monitoreo de temperatura y humedad relativa al interior del invernadero con la finalidad de brindar un ambiente de crecimiento óptimo para las plantas (Anexo K), el seguimiento realizado se detalla a continuación.

**Tabla 14-3:** Monitoreo de temperatura y humedad relativa al interior del invernadero

Monitoreo	Frecuencia			Variable	Equipos
Diario (durante 60 días )	Tres veces en el día			Temperatura	Termómetro
	Mañana	Medio día	Tarde	Humedad relativa	Higrómetro

**Realizado por:** Jennifer Orejuela, 2017

### 3.2.12. *Seguimiento de las unidades experimentales*

- Métodos analíticos de laboratorio para la caracterización del agua

La medición de sal, conductividad eléctrica, dureza, pH, temperatura y sólidos disueltos se realizó en el Laboratorio de Análisis Técnicos de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, según los métodos que se mencionan a continuación.

**Tabla 15-3:** Métodos analíticos para caracterizar el agua

Tipo de Muestra	Parámetro	Método
Muestra de Agua	Sal	Potenciométrico
	Conductividad eléctrica	2510-B
	Dureza	2340-C
	pH	4500-B
	Temperatura	2550-A
	Sólidos Disueltos	2540-D

Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

\*Método Potenciométrico

Los análisis se hicieron a través del método potenciométrico, el cual consiste en la medición de un potencial en una celda electroquímica. Es el único método electroquímico en el que se mide directamente un potencial de equilibrio termodinámico, donde no fluye corriente neta. El instrumental necesario para las medidas potenciométricas comprende un electrodo de referencia, un electrodo indicador y un dispositivo de medida potencial.

Dureza

Se depositó 25 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer con 1 ml de KCN, 2 ml de buffer pH 10 y una pizca de indicador Negro de Eriocromo T (Eriochromschwarz). Titulándolo con EDTA (0,02 M) pasando de color rojo al azul (Anexo L).

**3.2.13. Cuantificación de cromo (VI)**

La degradación de Cromo hexavalente se cuantificó de acuerdo a los datos obtenidos en los análisis de laboratorio, en las muestras de agua y tejido vegetal aéreo y radicular de la *Heliconia psittacorum*.

3.2.13.1. *Plan de muestreo de agua*

El seguimiento y control de la unidad experimental se ejecutó por 60 días, donde se realizaron 3 muestreos. Para cada análisis fue necesario una muestra integra de 600 ml de agua de cada una de las camas (Anexo M). La metodología utilizada para los análisis se indica en la Tabla 16-3.

**Tabla 16-3:** Monitoreo de agua

<b>Monitoreo</b>	<b>Frecuencia (días)</b>	<b>Parámetro</b>
<b>Inicial</b>	1	Cromo hexavalente Sal Conductividad eléctrica Dureza pH Temperatura Sólidos Disueltos
<b>Intermedio</b>	30	Cromo hexavalente Sal Conductividad eléctrica Dureza pH Temperatura Sólidos Disueltos
<b>Final</b>	60	Cromo hexavalente Sal Conductividad eléctrica Dureza pH Temperatura Sólidos Disueltos

Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

- Evaluación en laboratorio

Para determinar el cromo hexavalente de las muestras en agua (Anexo N) se utilizó un fotómetro DR 2800 marca HACH con alcance de longitud de onda de 540 nm, la metodología empleada se menciona a continuación:

1. Por tener concentraciones altas de Cromo hexavalente en las muestras fue necesario realizar varias diluciones con agua destilada, ya que la sensibilidad del fotómetro se encontraba en los 0,010- 0,700 mg/L de Cr<sup>6+</sup>.
2. En el fotómetro se seleccionó en Programas almacenados 90 Cromo hex.
3. Se llenó una cubeta cuadrada de una pulgada de 10 mL hasta la marca de 10 mL con la muestra.
4. Para preparar la muestra fue necesario añadir el contenido de un sobre de reactivo de cromo ChromaVer 3 en polvo, agitarlo con rotación para mezclar. En presencia de cromo hexavalente apareció un color violeta.
5. Se seleccionó en la pantalla del fotómetro el símbolo de temporizador y se pulso OK. Donde comenzó un periodo de reacción de 5 minutos.
6. Para la preparación del blanco se llenó otra cubeta cuadrada de una pulgada de 10 mL hasta la marca de 10 mL con muestra.
7. Después de sonar el temporizador, limpiar bien el exterior de la cubeta (el blanco) y colocar el blanco en el soporte porta cubetas con la marca de llenado hacia la derecha, Se seleccionó en la pantalla: Cero. La pantalla indicó 0,000 mg/L Cr<sup>6+</sup>.
8. Fue necesario limpiar bien el exterior de la cubeta (de la muestra preparada) y colocar la cubeta en el soporte porta cubetas con la marca de llenado hacia la derecha. Se seleccionó en la pantalla: Medición. El resultado apareció en mg/L.
9. Con los cálculos correspondientes asociados a las diluciones realizadas se obtuvo el valor real.

#### 3.2.13.2. *Plan de muestreo de tejido vegetal*

El muestreo del tejido vegetal de la planta se llevó acabo a la octava semana de tratamiento para cual fue necesario extraer manualmente la totalidad de las plantas del cultivo hidropónico (Anexo Ñ). El parámetro analizado fue cromo hexavalente en la aparte aérea y radicular de la planta.

- Evaluación en laboratorio

Para determinar el cromo hexavalente de las muestras de biomasa vegetal (Anexo O) se utilizó un fotómetro DR 2800 marca HACH con alcance de longitud de onda de 540 nm, la metodología utilizada se menciona a continuación:

1. Se tomó la muestra por separado de la parte aérea y radicular de la planta de cada recipiente donde se encontraba el cultivo hidropónico y fueron colocados en papel de aluminio para ser ingresadas a la estufa a una temperatura de 60 °C durante 24 horas
2. Una vez seca la biomasa se procedió a cortarla usando un molino hasta reducirla en pequeños pedazos
3. Se pesó en la balanza analítica la parte aérea y radicular previamente picada de forma separada
4. En varios Erlenmeyer se colocó 200 mL de agua destilada con la biomasa reducida de la planta tanto para la parte aérea como para la radicular por separado. Con la ayuda de un agitador Shaker orbital durante 24 horas se mezcló de forma homogénea la solución a 250 rpm
5. Se utilizó papel filtro para separar de la solución la porción líquida, de la cual se tomó 10 mL y se diluyó con agua hasta los 100 mL para la parte radicular y para la parte aérea se tomó 5 mL y fue llevada 100 mL ya que la biomasa es más abundante en esta sección.
6. Una vez diluidas las soluciones resultantes de la parte aérea y radicular de la planta se tomó 10 mL de cada una y se colocó ChromaVer3, así como también fueron usados otros 10 mL de las mismas soluciones sin la presencia de reactivo (como blanco) y se leyó en el Fotómetro. Los resultados obtenidos fueron en mg/L.

#### **3.2.14. Determinación de la eficacia de la *Heliconia psittacorum* cultivada hidropónicamente para fitorremediar cromo (VI)**

De los resultados obtenidos se llevó a cabo el cálculo para determinar el porcentaje de absorción de cromo (VI) en cultivo hidropónico y un análisis estadístico para conocer la eficacia de cada tratamiento.

### 3.2.14.1. *Calculo para la determinación de absorción de cromo (VI) en cultivo hidropónico*

A través de la cantidad absorbida del metal se pudo determinar la concentración en porcentaje de cromo (VI), en un tiempo determinado. El porcentaje de absorción se obtuvo aplicando las siguientes formulas:

Ecuación 2-3:

$$\% \text{ de Absorción a los 30 días} = \frac{(\text{Concentración inicial} - \text{Concentración intermedia})}{\text{Concentración inicial}} * 100$$

Ecuación 3-3:

$$\% \text{ de Absorción a los 60 días} = \frac{(\text{Concentración intermedia} - \text{Concentración final})}{\text{Concentración intermedia}} * 100$$

Ecuación 4-3:

$$\% \text{ de Absorción total} = \% \text{ de Absorción a los 30 días} + \% \text{ de Absorción a los 60 días}$$

### 3.2.15. *Relaciones de concentración del metal en la planta*

#### 3.2.15.1. *Factor de bioconcentración*

El factor de bioconcentración fue calculado dividiendo la concentración del metal en la fitomasa de la planta (mg/L) entre la concentración del elemento en agua (mg/L). Con la ayuda de las siguientes formulas:



Ecuación 5-3:

$$FCB_{raiz} = \frac{[Metal]_{raiz}}{[Metal]_{agua}}$$

Ecuación 6-3:

$$FCB_{aérea} = \frac{[Metal]_{aérea}}{[Metal]_{agua}}$$

Donde:

- $FCB_{raiz}$  = Factor de bioconcentración en la raíz de la planta
- $FCB_{aérea}$  = Factor de Bioconcentración en la parte aérea de la planta
- $[Metal]_{raiz}$  = Concentración del metal en la raíz de la planta en mg/L
- $[Metal]_{aérea}$  = Concentración del metal en la parte aérea de la planta en mg/L
- $[Metal]_{agua}$  = Concentración del metal en el agua en mg/L

### 3.2.15.2. Factor de translocación

El factor de translocación fue determinado con la división de la concentración de la fitomasa aérea (mg/L) entre la concentración de la fitomasa de la raíz de la planta. A través de la siguiente fórmula.

Ecuación 7-3:

$$TF = \frac{[Metal]_{aérea}}{[Metal]_{raiz}}$$

Donde:

- $TF$  = Factor de translocación
- $[Metal]_{aérea}$  = Concentración del metal en la parte aérea de la planta en mg/L

- $[Metal]_{raiz}$  = Concentración del metal en la raíz de la planta en mg/L

### 3.2.15.3. Clasificación de la planta en relación al factor de bioconcentración y translocación

Se podrá determinar si la planta es hiperacumuladora cuando la concentración absorbida sea mayor a 1000 mg/g (0.1 % de peso) de cromo. (Baker y Brooks, 1989, pp. 83-90) A continuación se describe los valores y su designación según el factor de bioconcentración y translocación del metal en la planta

- Factor de bioconcentración en la parte aérea.

Si el BCF en la parte aérea es  $< 1$  la planta es excluyente del metal pesado

Si el BCF en la parte aérea es  $>1$  pero  $< 10$  la planta es acumuladora del metal pesado

Si el BCF en la parte aérea es  $>10$  la planta es hiperacumuladora

- Factor de bioconcentración en la raíz de la planta

Si el BCF en la raíz es  $< 1$  la planta es excluyente del metal pesado

Si el BCF en la raíz es  $>1$  pero  $< 10$  la planta es acumuladora del metal pesado

Si el BCF en la raíz es  $>10$  la planta es hiperacumuladora

- Factor de translocación

Cuando el factor de translocación sea  $>1$  la planta trasfiere eficazmente el metal pesado desde la raíz a la parte aérea de la planta, por lo que su trabajo consiste en almacenar el metal en dicha zona. Si el factor de transferencia  $<1$  nos sugiere que la planta no traslada de manera eficaz el

metal pesado desde la raíz hacia la parte aérea de la planta concluyendo que su capacidad es la de fitoestabilizar el metal en la raíz de la planta.

## CAPÍTULO IV

### 4. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Resultados

##### 4.1.1. Seguimiento de los cambios aparentes en la *Heliconia psittacorum*

La *Heliconia psittacorum* por ser una especie vegetal procedente de lugares tropicales tuvo un periodo de adaptación de 30 días en invernadero bajo condiciones controladas de temperatura y humedad relativa. En dicho periodo no se observaron daños ni afectaciones a la planta por las condiciones ambientales generadas para su supervivencia. Por lo que los cambios manifestados son resultado de la fase experimental en la que se expuso a la planta a un contaminante a distintas concentraciones con la finalidad de conocer su respuesta física y su capacidad de fitorremediación.

Los cambios aparentes que se manifestaron en la especie vegetal fueron registrados una vez terminada la etapa experimental. Las características a ser tomadas en cuenta fueron presencia de necrosis, vigorosidad, longitud del tallo y raíces nuevas. En el capítulo anterior se menciona la metodología para la obtención de los resultados que se encuentran plasmados en tablas y graficas representativas de lo evaluado.

- Necrosis

Se observó daños físicos en las plantas que iniciaron presentando un color pardo- amarillo a los 30 días de haber sido expuestas a las aguas que contenían cromo (VI). Los ápices se quemaron y aparecieron pequeñas manchas de color negro en forma de lunares en sus hojas que con el paso de los días afectaron los peciols y posterior el tallo de las plantas. Las primeras *Heliconia psittacorum* en ser afectadas pertenecían al tratamiento C cuya concentración era la más alta de Cr (VI) en agua, seguido por el tratamiento B y con una menor afectación las plantas del tratamiento A. En la Tabla 17-4 de detalla lo antes descrito.

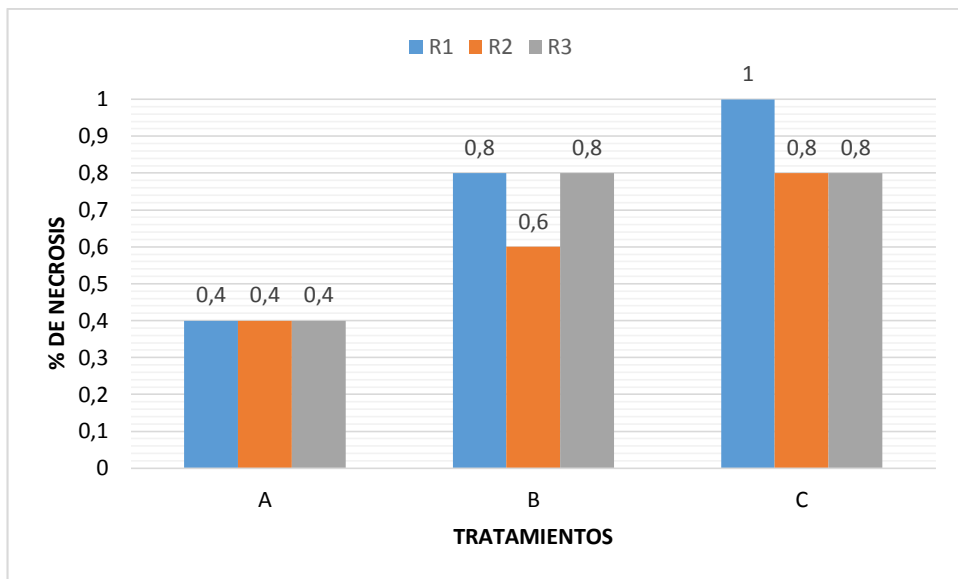
**Tabla 17-4:** Necrosis en *Heliconia psittacorum*

A															
Recipiente	R1					R2					R3				
Planta Número	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Presencia de Necrosis	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0
% de plantas con necrosis	0,4					0,4					0,4				
B															
Recipiente	R1					R2					R3				
Planta Número	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Presencia de Necrosis	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1
% de plantas con necrosis	0,8					0,6					0,8				
C															
Recipiente	R1					R2					R3				
Planta Número	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Presencia de Necrosis	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1
% de plantas con necrosis	1					0,8					0,8				

1: Necrosis presente  
0: Sin necrosis

**Fuente:** Datos recolectados por el investigador  
**Realizado por:** Jennifer Orejuela, 2017

A continuación se muestra la gráfica de presencia de necrosis al final del proceso



1=100%

**Gráfico 3-4.** Presencia de necrosis en plantas de *Heliconia psittacorum*

Fuente: Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

El Gráfico 3-4 muestra el porcentaje de necrosis en las plantas en un gráfico de columnas agrupadas, donde los tratamientos A, B y C presentan claras diferencias entre sí. El tratamiento A indica tan solo un 40 % de afectación en sus tres recipientes por igual, mientras los tratamientos B y C tienen los porcentajes más altos de necrosis por recipiente, siendo los mismos con las concentraciones más altas de cromo (VI) presente en el agua.

- Vigorositad

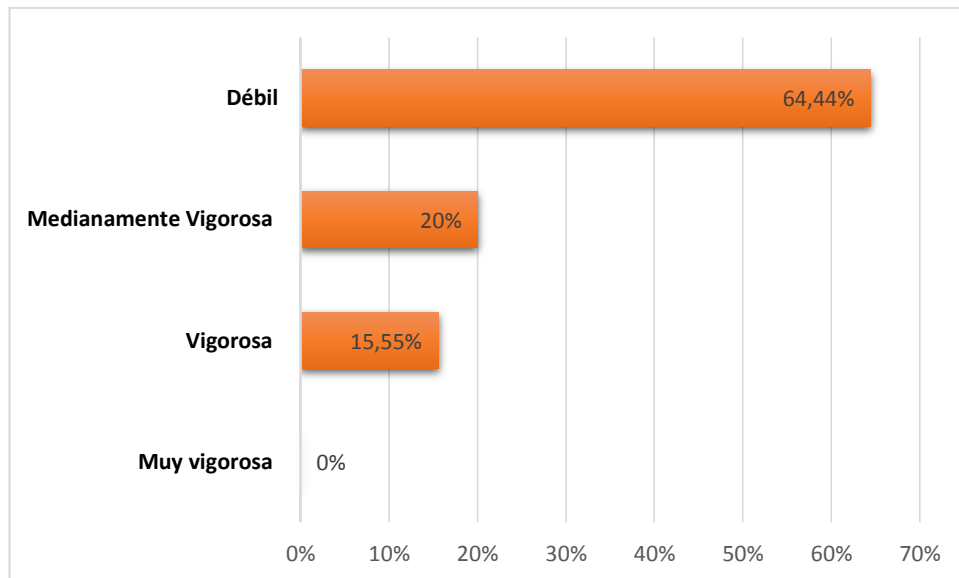
**Tabla 18-4:** Vigorositad en *Heliconia psittacorum*

A															
Recipiente	R1					R2					R3				
Planta Número	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Vigorositad en la planta	3	3	1	1	2	3	1	1	2	3	1	1	3	3	3
B															
Recipiente	R1					R2					R3				
Planta Número	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Vigorositad en la planta	1	1	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	1	1	2
C															
Recipiente	R1					R2					R3				
Planta Número	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Vigorositad en la planta	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1

4: Muy vigorosa  
 3: Vigorosa  
 2: Medianamente Vigorosa  
 1.: Débil

**Fuente:** Datos recolectados por el investigador  
**Realizado por:** Jennifer Orejuela, 2017

Una vez establecida la vigorositad a través de una evaluación cualitativa continua que presentaba cada planta de *Heliconia psittacorum* se realizó la suma y el promedio para posterior obtener el porcentaje correspondiente de vigorositad que se observa en el Gráfico 4-4. Donde el 63,44% del total de plantas se encuentra en un estado débil seguido por un 20% medianamente vigorosa, 15,55% vigorosa y 0% muy vigorosa por la ausencia de plantas en dicho estado. Tomando en cuenta que los resultados obtenidos de la presencia de necrosis fue alto en los tratamientos B y C la vigorositad de en las plantas de estos tratamientos corresponde a débil y el tratamiento A presenta la mejor vigorositad, datos que se respaldan en la Tabla 18-4.



**Gráfico 4-4.** Vigorosidad en plantas de *Heliconia psittacorum*  
**Fuente:** Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

- Longitud de la planta

La longitud del tallo fue medida en dos ocasiones, al principio y al finalizar el experimento donde las plantas mostraron un incremento respecto a la medida inicial. El tratamiento A en promedio de longitud ganó 3 cm en comparación con el B que solo adquirió 1 cm y el tratamiento C no presentó diferencia alguna a la longitud inicialmente registrada (Anexo P).

**Tabla 19-4:** Longitud promedio ganada por la planta

Longitud Tratamiento	Inicial	Final	Longitud promedio ganada
A	38 cm	41 cm	3 cm
B	43 cm	44 cm	1 cm
C	35 cm	35 cm	0 cm

**Fuente:** Datos recolectados por el investigador  
**Realizado por:** Jennifer Orejuela, 2017



- Raíces nuevas

El tratamiento A presentó en total 39 raíces nuevas, seguido por el tratamiento B muy de cerca con 33 raíces nuevas y en último lugar con una gran diferencia el tratamiento C, donde solo se encontraron 9 raíces nuevas concluida la fase experimental.

El sistema radicular de las *Heliconias psittacorum* pueden resistir un medio de crecimiento con temperaturas hasta de 1°C sin que afecte sus funciones y encontrándose el sistema hidropónico a una temperatura promedio de 18 °C en los tres tratamientos (Tabla 29-4) se puede asumir que este factor no influyó en su adaptación al medio, pero si la concentración del cromo (VI). Análisis basado en los resultados obtenidos de la Tabla 20-4.

**Tabla 20-4:** Raíces nuevas en la especie vegetal

<b>T</b>	<b>Raíces nuevas</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>
<b>A</b>		-	39
<b>B</b>		-	33
<b>C</b>		-	9

**Fuente:** Datos recolectados por el investigador

**Realizado por:** Jennifer Orejuela, 2017

#### 4.1.1.1. Análisis probit sobre la influencia de cromo (VI) en el vigor de la planta

Los valores utilizados en el análisis probit corresponden a los resultados de la Tabla 17-4 de la necrosis presente en la especie vegetal a los 60 días del experimento en el invernadero utilizando el programa Statgraphics Centurion XVI. La variable dependiente concierne a la respuesta (el % de plantas afectadas en relación al total), el tamaño de la muestra corresponde al total de plantas sembradas por cada recipiente y los factores que son las distintas concentraciones en este caso 10, 20 y 30 mg/L de cromo (VI).

Los resultados de ajustar un modelo de regresión probit para describir la relación entre la Respuesta y una variable (es) independiente (es) se obtiene a partir de la Tabla 21-4 de máxima verosimilitud.

**Tabla 21-4:** Modelo de regresión estimado

Parámetro	Estimado	Error
Constante	-0,896705	0,527925
Concentración	0,069856	0,0264599

**Fuente:** Datos recolectados por el investigador

**Realizado por:** Jennifer Orejuela, 2017

Debido a que el valor P del modelo en la Tabla 22-4 de Análisis de la desviación es menor que 0,05 existe una relación estadísticamente significativa entre las variables en el nivel de confianza del 95,0%. Además, el valor P de los residuos es superior a 0,05 lo que indica que el modelo es el mejor posible para estos datos con un nivel de confianza del 95,0% o superior.

**Tabla 22-4:** Análisis de la desviación

Fuente	Desviación	Df	P-Valor
<b>Modelo</b>	7,71798	1	<b>0,0055</b>
<b>Residual</b>	2,63173	7	0,9169
<b>Total (corregido)</b>	10,3497	8	

**Fuente:** Datos recolectados por el investigador

**Realizado por:** Jennifer Orejuela, 2017

Porcentaje de desviación explicado por el modelo = 74,572

Porcentaje ajustado = 35,9236

También se muestra la desviación en Respuesta explicado por el modelo es igual a 74,572%. Esta estadística es similar a la habitual R-cuadrado estadística. El porcentaje ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es de 35,9236%. Para determinar si el modelo puede ser simplificado, se observa que el valor P más alto para las pruebas de razón de verosimilitud es 0,0055 perteneciente a Concentración. Dado que el valor P es inferior a 0,05 se concluye que es estadísticamente significativo al nivel de confianza del 95,0%.

**Tabla 23-4:** Predicciones Inversas para Concentración

		<b>Inferior al 95,0%</b>	<b>Superior al 95,0%</b>
<b>Porcentaje</b>	<b>Concentración</b>	<b>Límite conferido</b>	<b>Límite conferido</b>
0,1	-31,401	-175,29	-9,74359
0,5	-24,037	-146,782	-5,43954
1,0	-20,4656	-132,966	-3,34168
2,0	-16,5632	-117,881	-1,03837
3,0	-14,0874	-108,319	0,43081
4,0	-12,2249	-101,13	1,54105
5,0	-10,7099	-95,2863	2,44796
6,0	-9,42035	-90,3155	3,22302
7,0	-8,2897	-85,9599	3,90531
8,0	-7,27734	-82,0624	4,51864
9,0	-6,35663	-78,5199	5,07867
10,0	-5,50912	-75,2612	5,59626
15,0	-2,0002	-61,7956	7,76568
20,0	0,788578	-51,1355	9,53179
25,0	3,1811	-42,0352	11,092
30,0	5,32966	-33,9159	12,5462
35,0	7,32062	-26,4595	13,9611
40,0	9,20985	-19,4754	15,3951
45,0	11,0377	-12,8508	16,915
50,0	<b>12,8365</b>	-6,53715	18,6163
55,0	14,6353	-0,561833	20,6559
60,0	16,4631	4,93678	23,3018
65,0	18,3523	9,70552	26,9511
70,0	20,3433	13,5453	31,9825
75,0	22,4919	16,5605	38,5409
80,0	24,8844	19,0834	46,6786
85,0	27,6732	21,4584	56,7298
90,0	31,1821	24,0366	69,7866
91,0	32,0296	24,6206	72,9789
92,0	32,9503	25,2434	76,4585
93,0	33,9627	25,9164	80,2964
94,0	35,0933	26,6557	84,595
95,0	36,3828	27,486	89,5105
96,0	37,8978	28,447	95,3
97,0	39,7603	29,6115	102,434
98,0	42,2362	31,1373	111,941

99,0	46,1385	33,5054	126,96
99,5	49,7099	35,6452	140,734
99,9	57,074	40,0058	169,186

**Fuente:** Datos recolectados por el investigador

**Realizado por:** Jennifer Orejuela, 2017

En esta tabla se indica las predicciones inversas obtenidas del modelo ajustado. Predicciones inversas que señalan el valor de concentración en el que el modelo alcanza ciertos porcentajes. Para el valor correspondiente de  $p = 50\%$  dosis de muerte letal de la mitad de la totalidad de individuos (LD50) es igual a 12,8365 ubicado en rojo en la tabla. Además se expresan los intervalos de confianza fiduciales para las predicciones inversas, basado en la teoría estadística la cual supone que los parámetros de población desconocidos constituyen variables aleatorias.

En la Tabla 23-4 la LD50 es de 12,8365 que corresponde a la concentración en mg/L de cromo VI requeridos para matar al 50% de la población de *Heliconias psittacorum* cultivada a través de la técnica de raíz flotante en agua en un lapso de 60 días.

#### **4.1.2. Variables de control en el invernadero**

##### *4.1.2.1. Monitoreo de temperatura y humedad relativa*

Los datos tomados al interior del invernadero se detallan en la Tabla 24-4, donde se presenta la temperatura en la mañana, medio día y noche.

**Tabla 24-4:** Control de temperatura (°C) al interior del invernadero

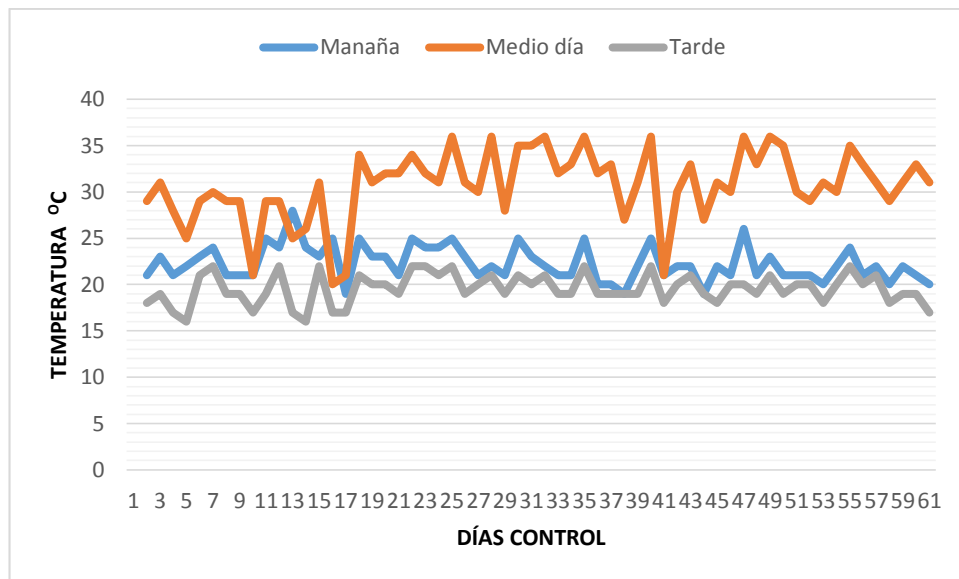
<b>Control Día</b>	<b>Mañana</b>	<b>Medio día</b>	<b>Tarde</b>
1	21	29	18
2	23	31	19
3	21	28	17
4	22	25	16
5	23	29	21
6	24	30	22
7	21	29	19
8	21	29	19
9	21	21	17
10	25	29	19
11	24	29	22
12	28	25	17
13	24	26	16
14	23	31	22
15	25	20	17
16	19	21	17
17	25	34	21
18	23	31	20
19	23	32	20
20	21	32	19
21	25	34	22
22	24	32	22
23	24	31	21
24	25	36	22
25	23	31	19
26	21	30	20
27	22	36	21
28	21	28	19
29	25	35	21
30	23	35	20
31	22	36	21

32	21	32	19
33	21	33	19
34	25	36	22
35	20	32	19
36	20	33	19
37	19	27	19
38	22	31	19
39	25	36	22
40	21	21	18
41	22	30	20
42	22	33	21
43	19	27	19
44	22	31	18
45	21	30	20
46	26	36	20
47	21	33	19
48	23	36	21
49	21	35	19
50	21	30	20
51	21	29	20
52	20	31	18
53	22	30	20
54	24	35	22
55	21	33	20
56	22	31	21
57	20	29	18
58	22	31	19
59	21	33	19
60	20	31	17
<b>Promedio</b>	22,28	30,67	19,65

Fuente: Datos recolectados por el investigador

Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

La variación de la temperatura se puede demostrar en la Figura 5-4



**Gráfico 5-4.** Variación de temperatura al interior del invernadero  
**Fuente:** Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

El Gráfico 5-4 nos indica la variación de la temperatura al interior del invernadero en tres diferentes tiempos (mañana, medio día y tarde) en los 60 días de control, donde se puede evidenciar que la temperatura más alta se presenta al medio día y la más baja por la tarde. Existen tres variaciones bien marcadas correspondientes al medio día donde la temperatura ha descendido drásticamente, fenómeno producido por la presencia de lluvia con abundante nubosidad y vientos fuertes, generando una baja temperatura ambiental. La temperatura promedio de los días de control en la mañana es de 22,28 °C y del medio día 30,67 °C, valores que se encuentran dentro del rango de temperatura idóneo para el desarrollo de la *Heliconia psittacorum*, siendo la excepción la temperatura de la tarde se encuentra por debajo de lo ideal con 1,45 °C. (Jerez, 2007, p. 31)

Los datos tomados al interior del invernadero se detallan en la Tabla 25-4, donde se presenta la humedad relativa en la mañana, medio día y noche con su respectivo promedio.

**Tabla 25-4:** Control de humedad relativa (%) al interior del invernadero

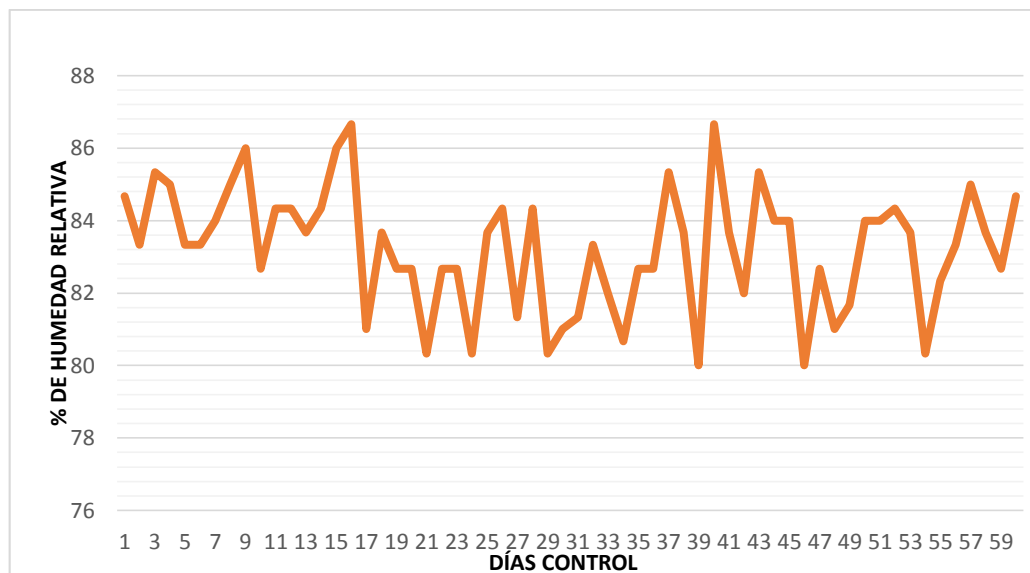
<b>Control Día</b>	<b>Mañana</b>	<b>Medio día</b>	<b>Tarde</b>	<b>Promedio</b>
1	86	80	88	85
2	85	79	86	83
3	86	81	89	85
4	85	83	87	85
5	85	80	85	83
6	84	80	86	83
7	86	80	86	84
8	86	80	89	85
9	86	86	86	86
10	83	80	85	83
11	84	80	89	84
12	81	83	89	84
13	84	82	85	84
14	85	79	89	84
15	83	86	89	86
16	87	86	87	87
17	83	73	87	81
18	85	79	87	84
19	85	77	86	83
20	86	77	85	83
21	83	73	85	80
22	84	77	87	83
23	84	79	85	83
24	83	72	86	80
25	85	79	87	84
26	86	80	87	84
27	85	72	87	81
28	86	81	86	84
29	83	72	86	80
30	85	72	86	81
31	85	72	87	81
32	86	77	87	83



33	86	75	85	82
34	83	72	87	81
35	86	77	85	83
36	86	75	87	83
37	87	82	87	85
38	85	79	87	84
39	83	72	85	80
40	86	86	88	87
41	85	80	86	84
42	85	75	86	82
43	87	82	87	85
44	85	79	88	84
45	86	80	86	84
46	82	72	86	80
47	86	75	87	83
48	85	72	86	81
49	86	72	87	82
50	86	80	86	84
51	86	80	86	84
52	86	79	88	84
53	85	80	86	84
54	84	72	85	80
55	86	75	86	82
56	85	79	86	83
57	86	80	89	85
58	85	79	87	84
59	86	75	87	83
60	86	79	89	85

**Fuente:** Datos recolectados por el investigador

**Realizado por:** Jennifer Orejuela, 2017



**Gráfico 6-4.** Humedad relativa promedio al interior del invernadero

Fuente: Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

El experimento se realizó en la ciudad de Riobamba cuya humedad relativa varía entre 50% y 70% siendo condiciones ambientales distintas a las de origen de la planta, motivo por el cual se realizó aspersiones continuas de agua en el suelo del invernadero para mantener la humedad relativa con un porcentaje superior al 70%. El monitoreo y control de la humedad relativa al interior del invernadero señala valores óptimos para la planta que oscilan entre 80% y 90% promedio al día, conforme se muestra en la Figura

#### 4.1.3. Seguimiento de las unidades experimentales

##### 4.1.3.1. Caracterización del agua

**Tabla 26-4:** Caracterización físico-química inicial de la muestra de agua de riego con presencia de cromo (VI)

Parámetro	Tratamiento A	Tratamiento B	Tratamiento C
Sólidos Disueltos	610 mg/L	610 mg/L	630 mg/L
Sal	0,5	0,5	0,5
Conductividad Eléctrica	1130 $\mu$ s/cm	1140 $\mu$ s/cm	1170 $\mu$ s/cm
pH	7,1	7,5	7,9
Temperatura	18,8°C	18,7 °C	18,8°C
Dureza	320 mg/L	352 mg/L	400 mg/L

Sal (%o)

Fuente: Resultados e interpretación del análisis físico-químico de agua en el Laboratorio de Calidad del Agua de la ESPOCH  
Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

Dentro de los análisis que se muestran en la Tabla 26-4 se pudo observar que la salinidad de 0,5 se encontraba en el rango adecuado para el crecimiento de la planta. La conductividad eléctrica con un valor por debajo de los 2500  $\mu\text{s}/\text{cm}$  no representa problema alguno para el desarrollo de la especie vegetal. El pH en el tratamiento C era el más elevado, pese a esto no estaba fuera de rango por lo que no se corrigió, ya que el pH del agua de riego oscila entre 7 y 8. Mientras que la temperatura de 18,8 °C promedio es la indicada en los sistemas hidropónicos. El agua poseía mucha dureza resultado del pH elevado pero no implica problemas para aguas de regadío.

**Tabla 27-4:** Caracterización físico-química intermedia de los tratamientos A, B y C

Parámetro \ Recipiente	Tratamiento A			Tratamiento B			Tratamiento C		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Sólidos Disueltos(mg/L)	550	560	555	610	600	558	610	600	620
Sal (‰)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	1045	1040	1050	1110	1100	1100	1160	1150	1165
pH (Und)	7	7,1	7,1	7,4	7,5	7,3	7,9	7,8	7,8
temperatura (°C)	19,6	19,4	19,1	19	19	19,2	18,9	19	19,2
Dureza (mg/L)	325	320	328	352	352	352	400	410	358

**Fuente:** Resultados e interpretación del análisis físico-químico de agua en el Laboratorio de Calidad del Agua de la ESPOCH  
**Realizado por:** Jennifer Orejuela, 2017

**Tabla 28-4:** Caracterización físico-química final de los tratamientos A, B y C

Parámetro \ Recipiente	Tratamiento A			Tratamiento B			Tratamiento C		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Sólidos Disueltos (mg/L)	540	550	545	600	550	550	565	565	580
Sal (‰)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	1020	1030	1030	1100	1105	1108	1130	1140	1150
pH (Und)	7	7,1	6,9	7,4	7,3	7,4	7,9	7,8	7,9
temperatura (°C)	18,3	18,6	18,2	18,5	18,4	18,2	18,7	18,5	18,7
Dureza (mg/L)	328	320	334	352	352	352	394	448	400

**Fuente:** Resultados e interpretación del análisis físico-químico de agua en el Laboratorio de Calidad del Agua de la ESPOCH  
**Realizado por:** Jennifer Orejuela, 2017

En las Tablas 27-4 y 28-4 se muestran los resultados físico-químicos intermedios y finales realizados a las muestras de agua de los nueve recipientes, con la finalidad de dar seguimiento a los parámetros que influyen en el proceso adaptativo y de desarrollo de la especie *Heliconia psittacorum*. A través de los análisis se constató que tales parámetros se encontraron siempre en el rango deseado para el crecimiento de la planta por lo cual no fue necesario la corrección de ninguno.

#### 4.1.4. Cuantificación de cromo (VI)

##### 4.1.4.1. Caracterización de cromo (VI) en muestras de agua y tejido vegetal

Se llevaron a cabo tres análisis de la concentración de cromo (VI) en agua. Los valores obtenidos se detallan en la Tabla 29-4.

**Tabla 29-4:** Concentración de cromo (VI) en agua en (mg/L)

Recipiente / Muestreo	Tratamiento A			Tratamiento B			Tratamiento C		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Inicial	10,00	10,00	10,00	20,00	20,00	20,00	30,00	30,00	30,00
<b>Promedio</b>	10,00			20,00			30,00		
Intermedio	8,28	8,78	8,65	17,95	18,25	18,40	29,20	29,50	29,30
<b>Promedio</b>	8,57			18,20			29,33		
Final	8,05	7,95	8,03	17,80	17,65	17,75	28,90	29,10	28,70
<b>Promedio</b>	8,01			17,73			28,90		

**Fuente:** Resultados e interpretación del análisis físico-químico de agua en el Laboratorio de Calidad del Agua de la ESPOCH  
**Realizado por:** Jennifer Orejuela, 2017

El análisis de la biomasa de la planta se efectuó al finalizar la esta experimental, donde la parte aérea y radicular fueron evaluadas por separado. Los resultados se reflejan en la tabla a continuación

**Tabla 30-4:** Concentración de cromo (VI) en tejido vegetal (mg/Kg)

Recipiente	Tratamiento A			Tratamiento B			Tratamiento C		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<i>H. psitacorum</i>									
Parte Aérea	1,38	1,24	1,16	1,26	1,68	1,74	0,76	0,5	0,82
<b>Promedio</b>	1,26			1,56			0,69		
Parte radicular	0,5	0,75	0,7	0,8	0,5	0,38	0,28	0,37	0,39
<b>Promedio</b>	0,65			0,56			0,35		

**Fuente:** Resultados e interpretación del análisis químico de la biomasa vegetal en el Laboratorio de Calidad del Agua de la ESPOCH

**Realizado por:** Jennifer Orejuela, 2017

#### 4.1.4.2. Análisis de varianza (ANOVA) a las concentraciones de cromo (VI) en agua

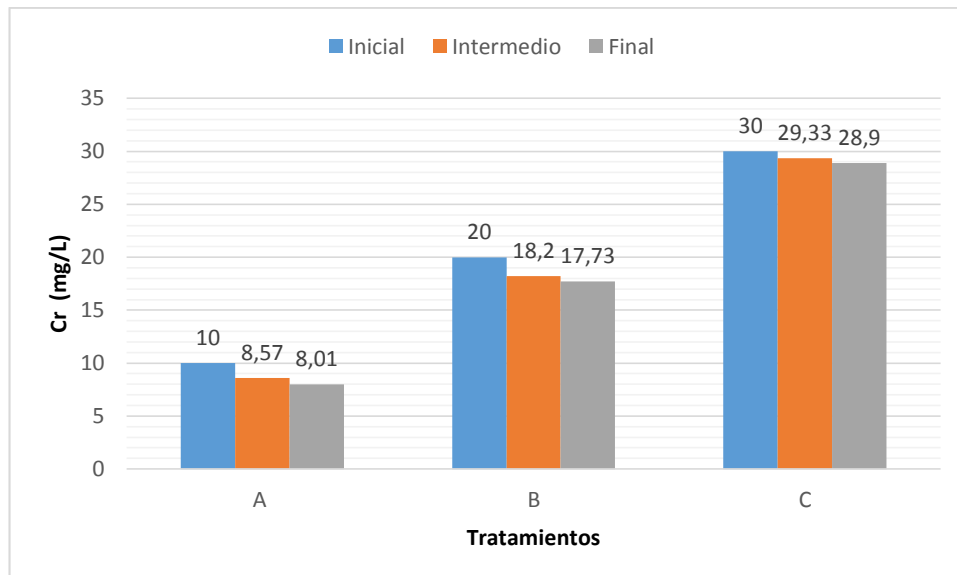
**Tabla 31-4:** Análisis de varianza a los tres tratamientos del metal pesado en agua

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	CM	F	P-valor
Modelo	413,45	2	206,72	364,81	<0,0001
Tratamientos	413,45	2	206,72	364,81	<0,0001
Error	3,4	6	0,57		
Total	416,85	8			

**Fuente:** Datos recolectados por el investigador

**Realizado por:** Jennifer Orejuela, 2017

Fue aplicado un análisis de varianza a los tratamientos A, B y C, obteniéndose un  $F=364,81$ , con un alfa de 0,05 y una confianza del 95%. El P-valor respectivo  $0,0001 < 0,05$  señaló que los valores de los tres tratamientos a diferentes concentraciones muestran diferencias significativas entre sí, por lo que se concluye que son estadísticamente diferentes.



**Gráfico 7-4.** Concentración de Cr (VI) en agua

Fuente: Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

En el Gráfico 7-4 se puede observar la diferencia de concentración de Cr (VI) en los tres tratamientos. La disminución del metal pesado en agua se da mejor en los tratamientos A y B con alrededor de 2mg/L en ambos casos y para el tratamiento C tan solo se reduce la concentración en agua a 1 mg/L del valor inicial.

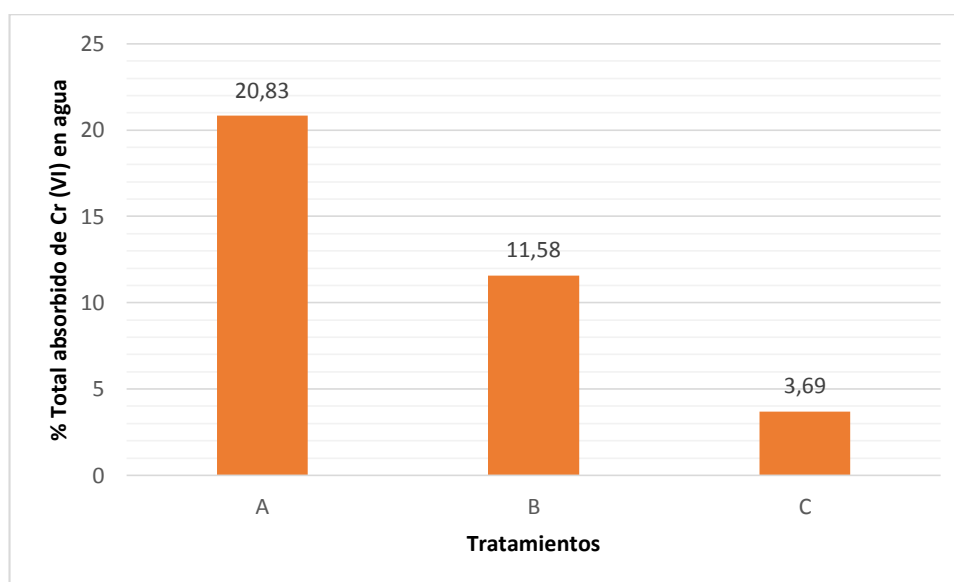
#### 4.1.4.3. *Determinación de la eficacia de la Heliconia psittacorum cultivada hidropónicamente para fitorremediar cromo (VI)*

A través de los análisis realizados a las muestras de agua se pudo determinar la concentración en porcentaje de cromo (VI) fitorremediada por la *Heliconia psittacorum* en cultivo hidropónico. Con los resultados expresados en la Tabla 30-4 remplazados en las formulas mencionadas en el ítem 2.2.14.1 se expone la tabla a continuación.

**Tabla 32-4:** Porcentaje de absorción de Cr (VI) en agua por la *Heliconia psittacorum*

<b>Tratamiento</b> <b>Absorción promedio</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
% a los 30 días	14,3	9	2,23
% a los 60 días	6,53	2,58	1,46
Total del % absorbido de cromo (VI)	20,83	11,58	3,69

**Fuente:** Datos recolectados por el investigador  
**Realizado por:** Jennifer Orejuela, 2017



**Gráfico 8-4:** Porcentaje final absorbido de Cr (VI) en agua por la *H. psittacorum*  
**Fuente:** Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

La *Heliconia psittacorum* cultivada hidropónicamente con técnica de raíz flotante muestra en el Gráfico 8-4 un 20,83% de eficacia para fitorremediar aguas con presencia de cromo (VI) a concentraciones de 10 mg/L, un 11,58% de eficacia en concentraciones de 20 mg/L y tan solo un 3,69% a concentraciones de 30 mg/L en 60 días. Por lo que se concluye que a concentraciones más bajas mayor es su eficacia para fitorremediar aguas con cromo hexavalente en cultivo hidropónico.

#### 4.1.5. Relaciones de concentración del metal en la planta

En este estudio se utilizó un total de 45 muestras de plantas (1 especie de planta, tres tratamientos con tres recipientes cada uno conteniendo 5 muestras de plantas) cultivadas hidropónicamente a través de la técnica de raíz flotante en agua de regadío con presencia de cromo (VI) de la Facultad de Recursos Naturales de la ESPOCH, bajo invernadero.

##### 4.1.5.1. Análisis de varianza (ANOVA) a las concentraciones de cromo (VI) en la raíz y en la parte aérea de la planta

**Tabla 33-4:** Análisis de varianza a los tres tratamientos del metal pesado en la raíz de la *Heliconia psittacorum*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	CM	F	P-valor
Modelo	0,15	2	0,07	3,22	0,1119
Tratamientos	0,15	2	0,07	3,22	0,1119
Error	0,14	6	0,02		
Total	0,28	8			

Fuente: Datos recolectados por el investigador

Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

Un análisis de varianza fue aplicado a los distintos tratamientos de metal pesado en la raíz de la *Heliconia psittacorum* obteniéndose un  $F = 3,22$  con un alfa de 0,05 y con una confianza del 95%. El P-valor respectivo de  $0,1119 > 0,05$  señaló que los valores de los tres tratamientos a diferentes concentraciones no representan diferencias significativas entre sí por lo que se concluye que los datos son estadísticamente iguales.



**Tabla 34-4:** Análisis de varianza a los tres tratamientos del metal pesado en la parte aérea de la *Heliconia psittacorum*

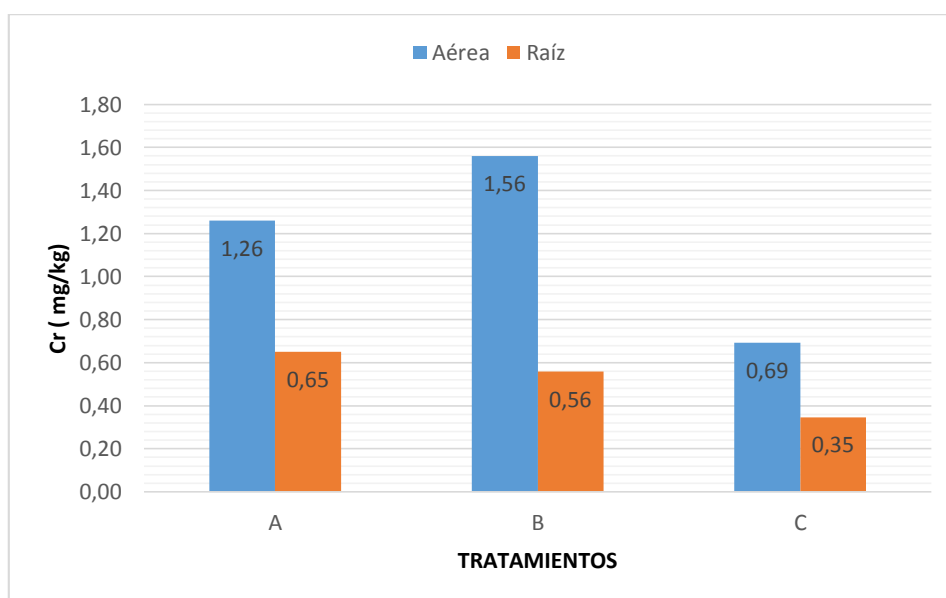
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	CM	F	P-valor
Modelo	1,29	2	0,64	8,35	0,0185
Tratamientos	1,29	2	0,64	8,35	0,0185
Error	0,46	6	0,08		
Total	1,75	8			

Fuente: Datos recolectados por el investigador

Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

De igual manera se aplicó análisis de varianza a los distintos tratamientos de metal pesado en la parte aérea de la planta obteniéndose un  $F= 8,35$ , con un alfa de 0,05 y con una confianza del 95%. El P-valor respectivo de  $0,0185 < 0,05$  indicó que los valores de los tres tratamientos a diferentes concentraciones muestran diferencias entre sí por lo que se concluye que los datos son estadísticamente diferentes.

Las concentraciones Cr (VI) en la planta van de 0,35 a 1,56 perteneciendo el máximo valor a la parte aérea de la *Heliconia psittacorum* y el menor a la raíz. (Tabla 30-4)



**Gráfico 9-4:** Concentración de Cr (VI) en raíz y parte aérea de la *Heliconia psittacorum*

Fuente: Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

En el Gráfico 9-4 se puede observar que la parte aérea de la *Heliconia psittacorum* acumula el doble de concentración de Cr (VI) en comparación a la raíz en los tres tratamientos. Los valores más altos corresponden a los tratamientos A y B. Se puede ultimar que a menores concentraciones de cromo (VI) en agua la cantidad absorbida por la planta de dicho metal es mayor, brindando mejores resultados de acumulación en la parte aérea.

#### 4.1.5.2. Factor de bioconcentración y translocación en plantas

**Tabla 35-4:** Factor de bioconcentración y translocación de cromo (VI) en la planta

Recipiente <i>H. psittacorum</i>	Tratamiento A			Tratamiento B			Tratamiento C		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
BCF	0,14	0,12	0,12	0,07	0,09	0,09	0,03	0,02	0,03
<b>Promedio</b>	0,13			0,08			0,03		
TF	<b>2,26</b>	<b>1,65</b>	<b>1,65</b>	<b>1,56</b>	<b>3,36</b>	<b>4,57</b>	<b>2,71</b>	<b>1,35</b>	<b>2,1</b>
<b>Promedio</b>	1,85			3,16			2,05		

BCF = Factor de Bioconcentración de metales pesados en las raíces de la planta  
TF=Factor de translocación de metales pesados en la planta

Valores >1 están resaltados en negrita

**Fuente:** Resultados e interpretación del análisis físico-químico de agua en el Laboratorio de Calidad del Agua de la ESPOCH

**Realizado por:** Jennifer Orejuela, 2017

Por los resultados obtenidos de BCF en la raíz de la planta <1 se considera excluyente de metal pesado en esa zona al igual que el BCF en la parte aérea. Mientras que el TF en la planta es >1 se considera que transfiere eficazmente el metal pesado desde la raíz a la parte aérea de la planta por lo que su trabajo consiste en almacenar el metal en dicha zona.

#### 4.1.5.3. Clasificación de la planta en relación al factor de bioconcentración y translocación

En esta investigación la especie *Heliconia psittacorum* no acumuló concentraciones > 1000 mg/L de cromo en ninguno de los tres tratamientos en la parte aérea de la planta (Tabla 30-4), por lo que no es hiperacumuladora. (Baker y Brooks, 1989, pp. 83-90) A pesar de esto la capacidad de estas plantas para acumular y tolerar metales pesados puede emplearse.

Realizando un análisis comparativo del BCF y TF se pudo detectar la capacidad de la planta en absorber el metal pesado del agua y enviarlo a su parte aérea. Aquellas especies vegetales que

tienen la característica de almacenar en su biomasa este tipo de contaminantes se consideran aptas para la fitoextracción por los valores que representan  $>1$  en translocación.

Esta especie pudo adaptarse a cultivos hidropónicos con presencia de cromo (VI), absorbiendo metales pesados en sus raíces y acumulándolos en mayor proporción en la parte aérea, por lo que alcanzó valores bajos de BCF y un TF relativamente alto, lo que implica que tiene una capacidad de translocación de metales pesados a la parte aérea y una capacidad limitada de bioconcentración en la raíz.

## CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un invernadero de 35 m<sup>2</sup> y 9 recipientes para el cultivo hidropónico de la *Heliconia psittacorum* con aireación permanente y la adición de solución nutritiva comercial ABOREC PLUS al agua, los días 1, 30 y 60 de la etapa experimental para brindar las condiciones necesarias de crecimiento de las muestras vegetales así como también se efectuó la caracterización físico-química del agua durante la investigación a través de la metodología establecida. Los análisis iniciales permitieron conocer las condiciones en las que se encontraba el agua de regadío con presencia de Cr (VI) y si existía la necesidad de corregir algún parámetro. Los análisis intermedios y finales indicaron si los tratamientos se estaban efectuando correctamente asegurando la absorción del metal pesado.
- La vigorosidad de la *Heliconia psittacorum* en cultivos hidropónicos a través de la técnica de raíz flotante con presencia de Cr (VI) a concentraciones de 10 mg/L, 20 mg/L y 30 mg/L, generó en un 63,44% de las plantas un estado débil, un 20% de plantas medianamente vigorosas, un 15,55% vigorosas y la ausencia de plantas en estado muy vigoroso. De los resultados obtenidos el tratamiento A presentó la mejor vigorosidad.
- Dado que el sistema radicular de la *Heliconia psittacorum* pueden resistir un medio de crecimiento con temperaturas hasta de 1°C sin que afecte sus funciones y encontrándose el sistema hidropónico a una temperatura promedio de 18 °C, se asume que este factor no influyó en su desarrollo pero si la concentración del cromo (VI), basándose en los daños físicos presentados en las plantas sometidas al tratamiento con el más alto contenido de metal pesado en agua.
- Mediante el análisis probit de los resultados conseguidos de necrosis en la planta se tuvo una relación estadísticamente significativa entre las variables y un nivel de confianza del 95,0% que a través de predicciones inversas proporcionó la LD50 (dosis letal necesaria para matar la mitad de la población) de *Heliconias psittacorum* cultivadas a través de la técnica de raíz flotante en agua en un lapso de 60 días igual a 12,8365 mg/L de Cr (VI).

- Fue aplicado un análisis de varianza a los tratamientos A, B y C de metal pesado en agua el P-valor respectivo  $0,0001 < 0,05$  señaló que los valores de los tres tratamientos a diferentes concentraciones muestran diferencias significativas entre sí. Se presenta un 20,83% de eficacia para fitorremediar aguas con presencia de cromo (VI) a concentraciones de 10 mg/L, un 11,58% de eficacia en concentraciones de 20 mg/L y tan solo un 3,69% a concentraciones de 30 mg/L en 60 días. Por lo que se concluye que a concentraciones más bajas mayor es su eficacia para fitorremediar aguas con cromo hexavalente en cultivo hidropónico.
- Esta especie pudo adaptarse a cultivos hidropónicos con presencia de cromo (VI), absorbiendo metales pesados en sus raíces y acumulándolos en mayor proporción en la parte aérea, por lo que alcanzó valores bajos de BCF y un TF relativamente alto, lo que implica que tiene una capacidad de translocación de metales pesados a la parte aérea y una capacidad limitada de bioconcentración en la raíz. La *Heliconia psittacorum* no es hiperacumuladora a pesar de esto la capacidad de estas plantas para acumular y tolerar metales pesados puede emplearse. Se determina que es excluyente de Cr (VI) considerándola apta para la fitoextracción.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar con el estudio de la familia heliconiaceae en particular de la especie *Heliconia psittacorum* en investigaciones similares, ya que en el trópico de Ecuador existe una población considerable de estas plantas al igual que en centro y sur de América.
- Se recomienda a las industrias que utilizan cromo (VI) en sus procesos, especialmente a la industria del cuero la utilización de la especie *Heliconia psittacorum* juntamente con la técnica de cultivo hidropónico para fitorremediar aguas a través de rizofiltración ya que la interacción entre la planta y el contaminante es más directa, limpia, se provechan íntegramente los espacios y no representa pérdidas económicas ni grandes montos de inversión para ser implementada.
- Experimentar con otras técnicas de cultivo en agua aparte de la de raíz flotante para realizar fitorremediación mejorando el tiempo de absorción.
- Someter a la *Heliconia psittacorum* a tratamientos con concentraciones inferiores de 10 mg/L para evitar presencia de necrosis y muerte por pérdida de vigor. Utilizando grandes volúmenes de agua con bajas concentración del metal y un mayor número de muestras vegetales por tratamiento.

## BIBLIOGRAFÍA

**ALBERT, LILIA A.** *Toxicología Ambiental*. Segunda. Reino Unido : Limusa, 2002. págs. 227-245.

**ÁLCOBA, PEDRO.** *Transferencia de elementos traza suelo-planta en suelos con influencia salina*. [En línea] Colombia, 2014. [Consulta: 06 de Marzo 2017.]. Disponible en: <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2014/CT%202014/1896711457.pdf>

**ECUADOR. ASAMBLEA CONSTITUYENTE.** Constitución Política de la República del Ecuador. 2008.  
<http://www.asambleanacional.gob.ec>

**ECUADOR. ASAMBLEA CONSTITUYENTE** .Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento de Agua. 2014.  
<http://www.agua.gob.ec>

**ECUADOR. ASAMBLEA CONSTITUYENTE.** Código Orgánico del Ambiente. 2017.  
<http://www.asambleanacional.gob.ec/sites/default/files/private/asambleanacional/filesasambleanacionalnameuid-29/Leyes%202013-2017/102-ambiente/ro-cod-ambiente-ro-s-983-12-04-2017.pdf>.

**AUDET Patrick & CHAREST Christiane.** “Heavy metal phytoremediation from a metaanalytical” *Environmental Pollution* [en línea], 2007, EE.UU, 1, Vol. 147, pp. 231-237. [Consulta 04 marzo 2017]  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749106004817>

**AULESTIA, KELLY L.** Respuestas fisiológicas de tres especies vegetales nativas sometidas a tratamiento con lixiviado de relleno sanitario [en línea]. (tesis pregrado) Universidad del Valle. Colombia, 2012. Pp. 1-42. [Consulta: 17 de febrero 2017.]. disponible en: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/3903/4/CB-0463669.pdf>.

**BAKER A. J. & BROOKS R. R.** “Terrestrial Higher Plants which Hiper-accumulate Metallic Elements - A Review of their Distribution, Ecology and Phytochemistry” *Academic Publishers Biorecovery* [en línea], 1989, (Reino Unido), Vol. 1, pp. 81-126. [Consulta: 18 febrero 2017]. Disponible en :  
[https://www.researchgate.net/profile/Alan\\_Baker2/publication/247713966\\_Terrestrial\\_Higher\\_Plants\\_Which\\_Hyperaccumulate\\_Metallic\\_Elements\\_A\\_Review\\_of\\_Their\\_Distribution](https://www.researchgate.net/profile/Alan_Baker2/publication/247713966_Terrestrial_Higher_Plants_Which_Hyperaccumulate_Metallic_Elements_A_Review_of_Their_Distribution)

**BELMONT Marco & METCALFE Chris.** “Feasibility of using ornamental plants (*Zantedeschia aethiopica*) in subsurface flow treatment wetlands to remove nitrogen, chemical oxygen demand and nonylphenol ethoxylate surfactants a laboratory-scale study” *Ecological engineering* [en línea], 2003, (EE.UU) : 21 pp. 233-247. [Consulta: 16 febrero 2017] Disponible en : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857403000934>

**BELTRÁN Mayra & GÓMEZ Alida.** “Mestales Pesados(Cd, Cr y Hg): su impacto en el ambiente y posibles estrategias biotecnológicas para su remediación”. Uniboyacá [en línea], 2015, (Colombia), pp. 12-83. [Consulta: 20 de octubre 2016]. Disponible en: <http://revistasdigitales.uniboyaca.edu.co/index.php/reiv3/article/download/113/111>.

**BELTRANO, José.** *Cultivo en Hidroponía*. Argentina : Edulp, 2015. pp. 7-180

**BENAVIDES, Patricia.** *Agrobiotecnología* [en línea]. México, 2016. [Consulta: 14 de marzo 2017.]. Disponible en: [http://www.fbmc.fcen.uba.ar/materias/agbt/teoricos/2011\\_17%20Fitorremediacion.pdf](http://www.fbmc.fcen.uba.ar/materias/agbt/teoricos/2011_17%20Fitorremediacion.pdf)

**BERNAL, Carpena.** “Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos”. , *Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente* [en línea], 2007, ( España) pp. 1-3. [Consulta: 01 febrero 2017] ISSN 1697-2473. Disponible en: [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/7663/1/ECO\\_16\(2\)\\_01.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/7663/1/ECO_16(2)_01.pdf)

**BRAGATO Claudia, BRIX Hans, MALAGOL Mario.** “Accumulation of nutrients and heavy metals in *Phragmites australis* (Cav.) Trin Ex Steudel and *Bolboschoenus maritimus* (L.) Palla in a constructed wetland of the Venice lagoon watershed”. *Environmental Pollution* [en línea], 2006, (Italia), Vol. 144, pp. 967-975. [Consulta 17 de noviembre 2016]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749106000935?via%3Dihub>

**BRENES Laura & JIMÉNEZ María.** Modelo de manejo de un sistema de producción de hortalizas de hoja bajo la modalidad de hidroponía NFT [en línea] (tesis pregrado). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. 2014. pp. 967-975. [ Consulta: 16 de febrero de 2017]. Disponible en: <http://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3371/modelo-manejo-sistema-produccion-C3%B3n-hortalizas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>



**CALDERÓN, Felipe.** “La solución nutritiva”. *Calderón Laboratorios* [en línea], 2004, Colombia, pp. 81-87. [Consulta: 07 de febrero 2017]. Disponible en: [http://www.drcalderonlabs.com/Hidroponicos/La\\_Solucion\\_Nutritiva.htm](http://www.drcalderonlabs.com/Hidroponicos/La_Solucion_Nutritiva.htm)

**CALDERON, Jesús.** Fitorremediación de aguas residuales por hidroponía [en línea] (Tesis Doctoral). Instituto Politécnico Nacional, Unidad Zacatengo. Mexico D.F. 2009, pp. 1-72. [Consulta: 28 de octubre 2017]. Disponible en: <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/5721/JES%C3%9AS%20TORRES%20CALDER%C3%93N.pdf?sequence=1>

**CASTILLO RODRÍGUEZ, Francisco.** *Biotecnología Ambiental* [en línea]. España : TÉBAR S.L., 2005. [Consulta: 2 de febrero 2017]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books>

**CHÁVEZ, Álvaro.** “Descripción de la nocividad del cromo procedente de la industria curtiembre y de las posibles formas de removerlo” *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* [ en línea], 2011, Colombia vol 9, pp. 41-49, Vol. 9, págs. 41-49. [Consulta: 18 de noviembre 2016]. ISSN 2248-4094. Disponible en: <http://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/6>

**COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL.** *Guía Ambiental para la Industria del Curtido y Preparado de Cueros* [en línea]. Colombia, 2006. [Consulta: 09 de marzo 2017]. Disponible en: <http://biblovirtual.minambiente.gov.co:3000/DOCS/MEMORIA/MAVDT-0124/MAVDT-0124.pdf.958-97785-4-2.>

**ECUADOR. CONGRESO NACIONAL.** Ley de Gestión Ambiental, Codificación. 2004. [content/uploads/downloads/2012/09/LEY-DE-GESTION-AMBIENTAL.pdf](http://content/uploads/downloads/2012/09/LEY-DE-GESTION-AMBIENTAL.pdf).

**ECUADOR. MINISTERIO DE AMBIENTE.** *Estudio de Potenciales impactos ambientales y vulnerabilidad relacionada con las sustancias químicas y tratamiento de desechos peligrosos en el sector productivo del Ecuador.* [ En línea]. Ecuador, 2010. [Consulta: 08 de marzo 2017]. Disponible en: <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/03/PART11.pdf>

**ECUADOR. MINISTERIO DEL AMBIENTE.** Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio del Ambiente, Libro VI [en línea]. Ecuador, 2007. [Consulta: 27 de enero 2017]. Disponible en: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>.

- DELGADILLO-LÓPEZ Angélica et al.** “Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación” *Tropical and Subtropical Agroecosystems* [en línea], 2011 (México) 14, pp. 597-612. [Consulta: 01 de febrero 2017]. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a2.pdf>
- EUROPA. ECHA.** European Chemicals Agency. 2009. <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.028.324>.
- ERÓSTEGUI, Carlos P.** Contaminación por metales pesados. [entrev.] Karla P. Romero Ledesma [entrevistador]. *Revista científica Ciencia Médica* [en línea]. 2009. pp. 10-45. [Consulta: 28 de enero 2017]. Disponible en: [http://www.scielo.org.bo/pdf/rccm/v12n1/v12n1\\_a13.pdf](http://www.scielo.org.bo/pdf/rccm/v12n1/v12n1_a13.pdf)
- FERNÁNDEZ, María.** Efecto de diferentes niveles de aireación de la solución nutritiva sobre el crecimiento y la calidad de canónigos y berros cultivados en bandejas flotantes [en línea] (tesis pregrado) ETSIA, Colombia, 2013. pp. 4-51. [Consulta: 23 de marzo 2017]. Disponible en: <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/3130/pfc5030.pdf?sequence=1>
- GARCÍA-JIMÉNEZ; et al.** “Aprovechamiento Del Cromo Presente En Efluentes Líquidos Contaminados Procedentes Del Curtido De Pieles Como Agente de Intercalación de Bentonitas” *Revista Politécnica* [en línea], 2009. Ecuador. pp. 1-7 [Consulta: 24 de Febrero 2017.]. Disponible en: [http://www.ciiq.org/varios/peru\\_2005/Trabajos/posters/P6.pdf](http://www.ciiq.org/varios/peru_2005/Trabajos/posters/P6.pdf)
- GILSANZ, Juan C.** *Hidroponía*. Uruguay, INIA Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología, 2007, pp. 7-26.
- GOLTRA, P.** *National Tropical Botanical Garden* [en línea]. EE.UU, 2003. [Consulta: 15 de Febrero 2017.] Disponible en: [http://ntbg.org/plants/plant\\_details.php?plantid=5957#top](http://ntbg.org/plants/plant_details.php?plantid=5957#top)
- GONZÁLEZ, Humberto.** “Recursos minerales de Colombia: Cromo”. *INGEOMINAS* [en línea]. 2007 Colombia, pp. 4-10. [Consulta: 30 de Enero 2017.] Disponible en: <http://documentslide.com/documents/cromo-revisado-rmuoz-noviembre-1.html#>
- GONZÁLEZ, Magdalena.** Capatación y movilización del cromo en plantas de maíz (*Zea Mays*) en el suelo suplementado con nutrientes minerales [en línea]. México, 2016

[Consulta: 31 de Enero 2017.] Disponible en:  
[https://prezi.com/mmkg\\_vm2f4cw/captacion-y-movilizacion-de-cromo-en-plantas-de-maiz-zea-m/](https://prezi.com/mmkg_vm2f4cw/captacion-y-movilizacion-de-cromo-en-plantas-de-maiz-zea-m/)

**GUEVARA et al.** “*Uso de la rizofiltración para el tratamiento de efluentes líquidos de cianuración que contiene cromo, cobre y cadmio*”. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* [en línea]. 20091, Ecuador, pp. 871-878. [Consulta: 03 de febrero 2017.] Disponible en:  
[https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj\\_](https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj_)

**HABERL Ramound et al.** “Constructed wetlands for the treatment of organic compounds”. *Journal of Soils & Sediments* [en línea], Vol. III, n° 2, 2003, Alemania pp. 109-124. [Consulta: 04 de diciembre 2016.] Disponible en:  
<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/agua2003/est.pdf>

**HERNÁNDEZ, Rubén.** *Nutrición Mineral de las Plantas* [En línea]. Colombia, 2002. [Consulta: 12 de diciembre 2016.] Disponible en:  
<http://www.forest.ula.ve/~rubenhg/nutricionmineral/#bibliograf%C3%ADa>.

**HERRERA, Alfredo.** “Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía”. *Terra Latinoamericana* [en línea], 1999, México, Vol. 17, 3, pp. 221-229. [Consulta: 08 de febrero 2017.] Disponible en:  
<https://chapingo.mx/terra/contenido/17/3/art221-229.pdf>

**HOPKIN, S. P.** *Handbook of ecotoxicology*. Inglaterra : Blackwell Science Ltd, 1993, pp. 397-427.

**HYDROENVIROMENT.** *Técnicas Hidropónicas* [en línea]. EE.UU, 2008. [Consulta: 03 de marzo 2017.] Disponible en:  
[http://hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main\\_page=page&id=30](http://hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=30).

**IANNACONE José & GUTIÉRREZ Ana.** “Ecotoxicidad de los agroquímicos lindano y clorpirifos sobre el nemátodo *Chlorella* y el ensayo con *Allium*”. *Agricultura Técnica* [en línea], 1999, Chile, pp. 85-95. [Consulta: 31 de enero 2017.] Disponible en:  
[http://www.chileanjar.cl/files/V59I2A02\\_es.pdf](http://www.chileanjar.cl/files/V59I2A02_es.pdf)

**SANTANA Tiina & WORLD HEALTH ORGANIZATION.** *Internacional Programme on Chemical Safety (IPCS)* [en línea]. Canadá : World Health Organization, 2009. pp. 87-89.

[Consulta: 28 de enero 2017.] Disponible en:  
<https://books.google.com.ec/books?id=yhmGSJlqqF8C&pg=PA88&dq=cromo>

**ISAN, Ana.** *Hidroponía, una agricultura más ecológica y sostenible* [En línea], 2013. [Consulta: 28 de enero 2017.] Disponible en: <http://www.ecologiaverde.com/hidroponia-una-agricultura-mas-ecologica-y-sostenible/>.

**JAMES, Bruce R.** *Chemical transformations of chromium in soils: Relevance to mobility, bio-availability and remediation*. [blog]. Inglaterra, European Virtual Institute for Speciation Analysis, 2002. [Consulta: 31 de enero 2017.] Disponible en: <http://www.chromium-asoc.com/publications/crfile8feb02.htm>.

**JEREZ, E.** “El cultivo de las Heliconias”., 2007, *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, Vol. 28, nº 1, (2007), (Costa Rica) pp. 29-35.

**JIMÉNEZ, María Luisa.** *Alternativas productivas en cultivos hidropónicos* [en línea]. Costa Rica : INTA, 2010. [Consulta: 02 de marzo 2017.] Disponible en: [http://www.platicar.go.cr/images/Comunidades\\_de\\_Practica/pdf/Cultivos-Hidroponicos.pdf](http://www.platicar.go.cr/images/Comunidades_de_Practica/pdf/Cultivos-Hidroponicos.pdf)

**KABATA-PENDIAS, A.** *Trace Elements in Soils and Plants [en línea]*. Tercera .EE.UU: CRC Press, Boca Raton , 2000 pp. 20-432. [Consulta: 20 de febrero 2017.] Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780125181501>

**KRESS John, BETANCUR Julio, ECHEVERRY Beatriz.** *Heliconias. Llamadas de la selva Colombiana* [en línea]. Segunda. Colombia : C.U. Ltda. [Consulta: 12 de febrero 2017.] Disponible en: [vhttps://books.google.com.ec/books](https://books.google.com.ec/books)

**LLUGANY M, TOLRA R, POSCHNRIENDER C.** “Hiperacumulación de metales: ¿una ventaja para la planta y para el hombre?”. *Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio ambiente* [en línea], 2007, Barcelona, Vol. 16, pp. 1- 5. [Consulta: 12 de febrero 2017.] Disponible en: <http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/124>

**LÓPEZ REVELO, Claudia B.** Evaluación de humedales artificiales a escala piloto para el tratamiento secundario de efluentes agroindustriales ( tesis pre grado) [en línea]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Ambiente y Desarrollo. Honduras, 2016, p 4-90. [Consulta: 18 de febrero 2017.] Disponible en: <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/5734/1/IAD-2016-T025.pdf>.

**LUCHO-CONSTANTINO Carlos et al.** “A multivariate analysis of the accumulation and fractionation of major and trace elements in agricultural soils in Hidalgo State, Mexico irrigated with raw wastewater.Environmental”. *Environment International* [en línea],

2004, México, pp. 2-5. [Consulta: 04 de enero 2017.] Disponible en: <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/a-multivariate-analysis-of-the-accumulation-and-fractionation-of-major-3lyq2P3dMK>

**MADERA-PARRA Carlos, PEÑA-SALAMANCA Enrique, SOLARTE-SOTO Juliana.**

“Efecto de la concentración de metales pesados en la respuesta fisiológica y capacidad de acumulación de metales de tres especies vegetales tropicales empleadas en la fitorremediación de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios”. *Ingeniería y Competitividad* [en línea], 2014, (Colombia), Vol. 16, pp. 172-190.[Consulta: 13 de noviembre 2016.]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291333276016>

**MAZZA, Giuseppe.** *Heliconia psittacorum* [en línea]. EE.UU, 2010.[Consulta: 14 de febrero 2017]. Disponible en: <http://www.photomazza.com/?Heliconia-psittacorum&lang=es>.

**McCann, Michael.** *Cueros, pieles y calzado* [en línea]. España, 2000. [Consulta: 07 de marzo 2017]. Disponible en: [books.google.com.ec/books?id=gcBIjgEACAAJ](https://books.google.com.ec/books?id=gcBIjgEACAAJ)

**MCGRATH S, SIDOLI M, BAKET J, REEVES R.** “The potential for the use of metal-accumulating plants for the in situ decontamination of metal-polluted soils: Integrated Soil and Sediment Research: A Basis for proper Protection”. Kluwer Academic Publishers [en línea], 1993, (Nueva Zelanda) Vol. I, pp. 673-676. [Consulta: 07 de marzo 2017]. Disponible en: [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-94-011-2008-1\\_145](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-94-011-2008-1_145)

**MEDINA Katy & MONTANO Yeidy.** Determinación del Factor de Bioconcentración y Translocación de metales pesados en el *Juncus articus* Willd. Y *Costaderia rudiusscula* Stapf, de áreas contaminadas con el pasivo ambiental minero Alianza-Ancash (tesis pregrado) [en línea], Universidad Nacional “ Santiago Antúnez de Mayolo”. Perú, 2013. pp. 13-100. [Consulta: 04 de marzo 2017]. Disponible en: [http://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user\\_upload/p\\_biorem/education/research/publications/Theses/Tesis\\_Medina\\_y\\_Montano\\_2014.pdf](http://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_biorem/education/research/publications/Theses/Tesis_Medina_y_Montano_2014.pdf)

**MÉXICO. ASOCIACIÓN HIDROPÓNICA A. C.** *¿Qué es la hidroponía?* [en línea]. Mexico, 2012. [Consulta: 04 de febrero 2017.] Disponible en : <http://hidroponia.org.mx/cultivo-hidroponico/que-es-la-hidroponia/>

**MONTOYA Naney, AGUILAR Patricia, CORDOVEZ de Clemencia.** “Plomo, cromo III y cromo VI y sus efectos sobre la salud humana”. *Ciencia & Tecnología para la Salud Visual y Ocular* [en línea]. 2010, (Colombia), Vol. VIII, pp. 77-78. [Consulta: 26 de enero 2017]. Disponible en: <https://revistas.lasalle.edu.co/index.php/sv/article/view/831>

- MOSQUERA, Jairo.** “Cromo en Urgencias Toxicológicas.”[en línea], 2010, (Colombia). [Consulta: 21 de enero 2017]. Disponible en: <https://encolombia.com/medicina/guiasmed/u-toxicologicas/cromo/>
- NAVARRO-AVIÑÓ et al.** “Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas.” *ECOSISTEMAS* [en línea], 2007, (España) Vol. 16, pp 10-16. [Consulta: 30 de enero 2017]. Disponible en: <http://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/125>
- NOVEDADES AGRÍCOLAS.** *Riego Hidropónico* [en línea]. México,2016. [Consulta: 03 de marzo 2017.]. Disponible en: <http://www.novedades-agricolas.com/es/riego/sistemas-de-riego/riego-hidroponico>.
- NÚÑEZ-LÓPEZ et al.** “Fitorremediación: fundamento y aplicaciones”. *Ciencia* [en línea]. 2004, México, pp. 69-82. [Consulta: 01 de febrero 2017.]. Disponible en: [http://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55\\_3/Fitorremediacion.pdf](http://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_3/Fitorremediacion.pdf)
- NÚÑEZ-LÓPEZ. et al.** “Rizofiltración, Lixiviación y electro-recuperación: una propuesta integral para el tratamiento de aguas contaminadas con plomo a partir del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*)”. *Ciencia* [en línea],2009, México , pp.. 17-31. [Consulta: 03 de Enero 2017.]. Disponible en: [http://www.uaq.mx/investigacion/revista\\_ciencia@uaq/ArchivosPDF/v2-n1/Rizofiltracion.pdf](http://www.uaq.mx/investigacion/revista_ciencia@uaq/ArchivosPDF/v2-n1/Rizofiltracion.pdf)
- OASIS.** *Manual de hidroponía* [en línea]. México: Mobkii, 2015. [Consulta: 03 de Marzo 2017.]. Disponible en: <http://www.oasisfloral.mx/pdf/manual-hidroponia.pdf>.
- OTZOY Mynor, SOSOF Jorge, SOSOF Juan.** Búsqueda, recolección, evaluación de cinco sistemas de producción de cultivares de flores de la Zingiberaceae, en el sur occidente de Guatemala (proyecto) [en línea]. Universidad San Carlos de Guatemala, Programa universitario de Investigación en Recursos Naturales y Ambiente (PIURNA), Guatemala 2003. pp 1-78 [Consulta: 13 de febrero 2017.]. Disponible en: <http://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/puirna/INF-2005-018.pdf>.
- PEÑA-SALAMANCA Enrique et al.** “Las plantas que limpian. Uso de la biodiversidad de la flora local para aplicaciones en biorremediación”. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas* [en línea], 2005, (Colombia), pp. 43-44. [Consulta: 25 de octubre 2016.]. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-39082013000400004](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082013000400004)

**PEÑA-SALAMANCA Enrique et al.** “Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación”. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* [en línea], 2013, (Colombia), Vol. 37 (145), pp 473-479. [Consulta: 15 de diciembre 2016.]. ISSN 0370-3908. Disponible en: <http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/29>

**PEÑARRIETA Claudio et al.** “Manual para el manejo de flores de corte”. *Zamorano* [en línea], 2001, (Colombia) [Consulta: 15 de marzo 2017.]. Disponible en: [https://catalogo.zamorano.edu/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=23635&shelfbrowse\\_itemnumber=32163](https://catalogo.zamorano.edu/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=23635&shelfbrowse_itemnumber=32163).

**Prieto-Méndez Judith , GONZÁLEZ César, ROMÁN Alma.** “Contaminación y fitotoxicidad en las plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua”. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* [en línea], 2009, (México) , Vol. 10 (1), pp. 29-44. [Consulta: 31 de enero 2017.]. ISSN 1870-0462. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93911243003>

**QUISHPE Angela, DE LA TORRE Ernesto, GUEVARA Alicia.** “Tratamiento de efluentes líquidos de la industria de curtido mediante precipitación química, adsorción con carbón activado y rizofiltración”. *Revista Politécnica* [en línea], . 2012, (Ecuador) Vol. 31 (1), págs. 117-122. [Consulta: 16 de marzo 2017.]. Disponible en: [http://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista\\_politecnica2/article/view/200](http://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/200)

**RAJENDRAN P., MUTHUKRIHNNAN J., GUNASEKARAN P.** “Microbes in heavy metal remediation”. *Indian Journal of Experimental Biology* [en línea], 2003, (India), pp. 935-944. [Consulta: 03 de diciembre 2016.]. Disponible en: [http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/17153/1/IJEB%2041\(9\)%20935-944.pdf](http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/17153/1/IJEB%2041(9)%20935-944.pdf)

**REICHENAUER Thomas & GERMIDA James.** “Phytoremediation of organic contaminants in soil and groundwater”. *ChemSusChem* [en línea], 2008, (Australia), Vol. 1, pp. 708-719. [Consulta: 02 de febrero 2017.]. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com>

**ESPAÑA. REGISTRO ESTATAL DE EMISIONES Y FUENTES CONTAMINANTES. PRTR. CR (CROMO Y COMPUESTOS)** [en línea]. España, 2006. [Consulta: 26 de enero 2017.]. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/Cr-Cromo-y-compuestos,15606,11,2007.html>.

**ROBINSON B. H. et al.** “The nickel hyperaccumulator plant *Alyssum bertolonii* as a potential agent for phytoremediation and phytomining of nickel”. *Journal Geochemical Exploration*

[en línea], 1997, (Italia), 59, pp. 75-86. [Consulta: 06 de enero 2017.]. Disponible en:  
<http://www.kiwiscience.com/JournalArticles/JGE1997a.pdf>

**SÁNCHEZ Luisa & VÉLEZ Yermis.** Diseño y evaluación de un sistema piloto para la descontaminación de aguas residuales generadas en la UFPSO empleando las especies *Costus spicatus* y *Heliconia psittacorum* (tesis pre grado) [en línea]. Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ciencias Agrarias y de Ambiente, (Colombia). 2016. pp. 6-122 [Consulta: 19 de febrero 2017.]. Disponible en:  
<http://repositorio.ufpso.edu.co:8080/dspaceufpso/bitstream/123456789/1340/1/29539.pdf>.

**SERRANO CERMEÑO, Zoilo.** *Construcción de invernaderos* [en línea]. Tercera. España : Mundi Prensa, 2005. [Consulta: 18 de marzo 2017.]. Disponible en:  
<https://books.google.es>

**SINGH O. V. et al.** “Phytoremediation: an overview of metallic ion decontamination from soil”. *Applied Microbiology and Biotechnology* [en línea], 2003, (EE:UU) ,61, pp. 405-412.. [Consulta: 20 de febrero 2017.]. ISSN 0175-7598. Disponible en:  
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00253-003-1244-4>

**WU Gang et al.** “A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metal from contaminated soil: Issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities”. *Journal of Hazardous Materials* ,(2009), (China), pp. 1-8.

**ZÚÑIGA BATISTA, Francisco.** *Introducción al Estudio de la contaminación del Suelo por Metales Pesados* . México : Ediciones de la Universidad autónoma de Yucatán, 1999. pp. 17-109.



## ANEXOS

### Anexo A. Invernadero tipo túnel para el estudio de la *Heliconia psittacorum*

<p>Construcción del invernadero tipo túnel en las inmediaciones de la Facultad de Recursos Naturales de la ESPOCH</p>	
<p>Invernadero tipo túnel de 35 m<sup>2</sup> construido</p>	

### Anexo B. Modificación de las cortinas

<p>Se modificaron las cortinas laterales del invernadero incorporando un manubrio para facilitar la entrada de aire.</p>	
--	--

**Anexo C.** Recipientes para el cultivo hidropónico

Se construyó 9 recipientes cada uno de 0,60 m de largo, 0,60 de ancho y 0,20 de profundidad para el cultivo hidropónico



**Anexo D.** Cubiertas de las camas hidropónicas

Recorte de las cubiertas de espuma Flex de 0,60m de ancho, 0,60m de largo y 5 cm de grosor



Cubiertas de espuma Flex con perforaciones de 3cm de diámetro y espuma para siembra de plantas



**Anexo E.** Siembra de *Heliconia psittacorum*

*Heliconia psittacorum* en solución nutritiva



Siembra de *Heliconia psittacorum* previo a la fase de adaptación de 30 días



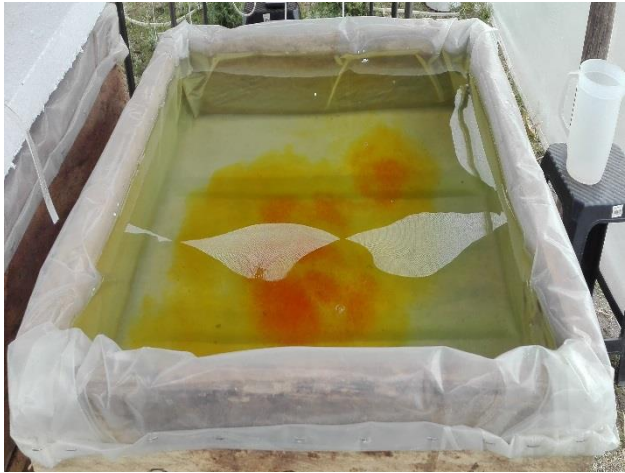

**Anexo F.** Fase de adaptación de la *Heliconia psittacorum* en cultivo hidropónico

*Heliconia psittacorum* en la fase de adaptación






**Anexo G.** Incorporación del contaminante a las muestras de agua

<p>Incorporación de <math>K_2Cr_2O_7</math> a la muestra de agua</p>	
<p>Muestra de agua con presencia de cromo (VI)</p>	

**Anexo H.** Suministro de aireación al cultivo hidropónico

<p>Aireación aplicada a través de motores de aireación para acuario, cada uno con tres conexiones individuales para los recipientes.</p>	
--	--


**Anexo I.** Presencia de necrosis en la especie vegetal *Heliconia psittacorum*

<p>Presencia de necrosis en la hoja de la <i>Heliconia psittacorum</i> a la quinta semana de experimental</p>	
---	--



**Anexo J.** Toma de la longitud del tallo y conteo de raíces nuevas en la *H. psittacorum*

<p>Medición de la longitud del tallo</p>	
<p>Raíces nuevas de la <i>Heliconia psittacorum</i> en cultivada con la técnica de raíz flotante</p>	

**Anexo K.** Monitoreo de temperatura

<p>Monitoreo y control de temperatura al interior del invernadero</p>	
---	--

**Anexo L.** Análisis en laboratorio de la dureza del agua

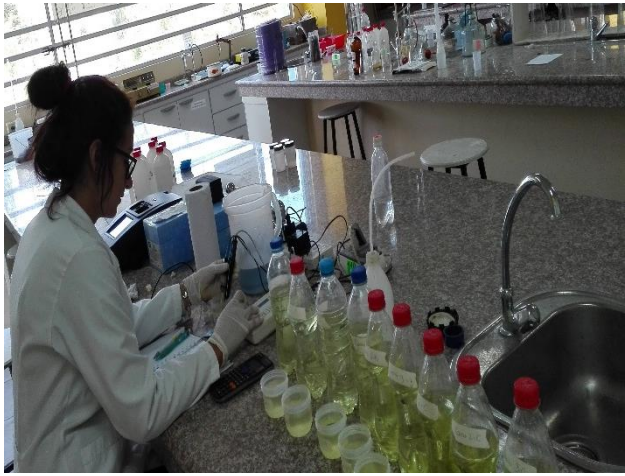

<p>Titulación con EDTA (0,02 M) pasando de color rojo al azul para la determinación de dureza del agua</p>	
<p>Análisis de dureza en los tres tratamientos</p>	



**Anexo M.** Muestreo del agua

<p>Toma de muestra íntegra de 600 ml de agua para análisis</p>	
--	--

**Anexo N.** Análisis en laboratorio de cromo (VI) en agua

<p>Análisis en laboratorio de cromo (VI) en agua</p>	
<p>El agua con el reactivo ChromaVer3 ante la presencia de cromo (VI) reacciona cambiando a un color violeta</p>	

**Anexo Ñ.** Muestreo del tejido vegetal

Toma de muestra de biomasa de la *Heliconia psittacorum*



**Anexo O.** Determinación de cromo (VI) en la biomasa vegetal

Secado de la biomasa en la estufa durante 24 horas a 60 °C



Se cortó la fitomasa usando un molino hasta reducirla en pequeños pedazos





Con la ayuda de un agitador Shaker orbital durante 24 horas se mezcló de forma homogénea la solución a 250 rpm



Se utilizó papel filtro para separar de la solución la porción líquida



Una vez diluidas las soluciones resultantes de la parte aérea y radicular de la planta se tomó 10 mL de cada una y se colocó ChromaVer3



**Anexo P.** Registro de la longitud del tallo de la *H. psittacorum*

Tratamiento	R 1-A		R 2-A		R 3-A	
	T. inicial	T. final	T. inicial	T. final	T. inicial	T. final
1	37	41	39	42	39	42
2	36	39	38	41	38	41
3	37	42	39	42	37	39
4	37	40	37	40	39	41
5	39	41	37	39	40	43
<b>Promedio</b>	37,2	40,6	38	40,8	38,6	41,2

T= Tamaño

Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

Tratamiento	R 1-B		R 2-B		R 3-B	
	T. inicial	T. final	T. inicial	T. final	T. inicial	T. final
1	44	47	42	43	44	44
2	43	44	45	46	41	42
3	42	41	42	43	43	44
4	43	45	41	42	44	46
5	42	43	44	45	42	43

T= Tamaño

Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

Tratamiento	R 1-C		R 2-C		R 3-C	
	T. inicial	t. final	T. inicial	T. final	T. inicial	T. final
1	33	33	33	33	34	34
2	37	37	35	35	38	38
3	34	34	34	34	32	32
4	34	34	38	38	35	35
5	36	36	35	35	36	36
<b>Promedio</b>	34,8	34,8	35	35	35	35

T= Tamaño

Realizado por: Jennifer Orejuela, 2017

**Anexo Q.** Resultados iniciales del análisis físico-químico de agua en el Laboratorio de Calidad del Agua de la ESPOCH

# ESPOCH

## LABORATORIO DE ANÁLISIS TÉCNICOS FACULTAD DE CIENCIAS

Casilla 06-01-4703

Telefax: 2998 200 ext 332

Riobamba - Ecuador

### INFORME DE ANÁLISIS INICIALES DE AGUAS

Análisis solicitado por: Jennifer Alexandra Orejuela Romero

Tipo de muestras: Agua de riego contaminada con cromo (VI)

Localidad: Facultad de Recursos Naturales de la ESPOCH

#### MUESTRA A

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
pH	Und	4500-B	7,1
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1 130
Temperatura	°C	2550-A	18,8
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	610
Cromo (VI)	mg/L	8023	10
Dureza	mg/L	2340-C	320
Sal	‰	Potenciométrico	0,5

#### MUESTRA B

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
pH	Und	4500-B	7,5
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1 140
Temperatura	°C	2550-A	18,7
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	610
Cromo (VI)	mg/L	8023	20
Dureza	mg/L	2340-C	352
Sal	‰	Potenciométrico	0,5

Fuente: Laboratorio de Calidad del Agua

## MUESTRA C

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
pH	Und	4500-B	7,9
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1 170
Temperatura	°C	2550-A	18,8
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	630
Cromo (VI)	mg/L	8023	30
Dureza	mg/L	2340-C	400
Sal	‰	Potenciométrico	0,5

\*Métodos Normalizados. APHA, AWWA, WPCF 17 ed.

Observaciones:

Atentamente.

Dra. Gina Álvarez R. SPOCH  
RESP. LAB. CALIDAD DEL AGUA



Fuente: Laboratorio de Calidad del Agua

**Anexo R.** Resultados intermedios del análisis físico-químico de agua en el Laboratorio de Calidad del Agua de la ESPOCH

# ESPOCH

**LABORATORIO DE ANÁLISIS TÉCNICOS  
FACULTAD DE CIENCIAS**

Casilla 06-01-4703

Telefax: 2998 200 ext 332

Riobamba - Ecuador

## **INFORME DE ANÁLISIS INTERMEDIOS DE AGUAS**

Análisis solicitado por: Jennifer Alexandra Orejuela Romero

Tipo de muestras: Agua de riego contaminada con cromo (VI)

Localidad: Facultad de Recursos Naturales de la ESPOCH

### **MUESTRA R1-A**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
pH	Und	4500-B	7,0
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1 045
Temperatura	°C	2550-A	19,6
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	550
Cromo (VI)	mg/L	8023	8,28
Dureza	mg/L	2340-C	325
Sal	‰	Potenciométrico	0,5

### **MUESTRA R2-A**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
pH	Und	4500-B	7,1
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1040
Temperatura	°C	2550-A	19,4
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	560
Cromo (VI)	mg/L	8023-	8,78
Dureza	mg/L	2340-C	320
Sal	‰	Potenciométrico	0,5

### **MUESTRA R3-A**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
pH	Und	4500-B	7,1
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1 050
Temperatura	°C	2550-A	19,1
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	555
Cromo (VI)	mg/L	8023	8,65
Dureza	mg/L	2340-C	328
Sal	‰	Potenciométrico	0,5

Fuente: Laboratorio de Calidad del Agua

**MUESTRA R1-B**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
pH	Und	4500-B	7,4
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1 110
Temperatura	°C	2550-A	19
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	610
Cromo (VI)	mg/L	8023	17,95
Dureza	mg/L	2340-C	352
Sal	‰	Potenciométrico	0,5

**MUESTRA R2-B**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
pH	Und	4500-B	7,5
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1 100
Temperatura	°C	2550-A	19
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	600
Cromo (VI)	mg/L	8023	18,25
Dureza	mg/L	2340-C	352
Sal	‰	Potenciométrico	0,5

**MUESTRA R3-B**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
pH	Und	4500-B	7,3
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1 100
Temperatura	°C	2550-A	19,2
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	558
Cromo (VI)	mg/L	8023	18,40
Dureza	mg/L	2340-C	352
Sal	‰	Potenciométrico	0,5

**MUESTRA R1-C**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
pH	Und	4500-B	7,9
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1 160
Temperatura	°C	2550-A	18,9
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	610
Cromo (VI)	mg/L	8023	29,20
Dureza	mg/L	2340-C	400
Sal		Potenciométrico	0,5

Fuente: Laboratorio de Calidad del Agua

### MUESTRA R2-C

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
pH	Und	4500-B	7,8
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1 150
Temperatura	°C	2550-A	19
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	600
Cromo (VI)	mg/L	8023	29,50
Dureza	mg/L	2340-C	410
Sal		Potenciométrico	0,5

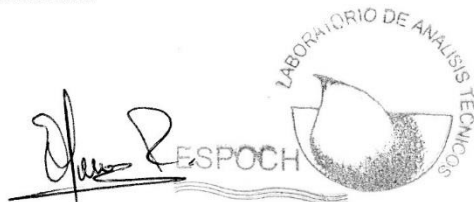
### MUESTRA R3-C

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
pH	Und	4500-B	7,8
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1 165
Temperatura	°C	2550-A	19,2
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	620
Cromo (VI)	mg/L	8023	29,30
Dureza	mg/L	2340-C	358
Sal	‰	Potenciométrico	0,5

\*Métodos Normalizados. APHA, AWWA, WPCF 17 ed.

Observaciones:

Atentamente.



Dra. Gina Álvarez R.  
RESP. LAB. CALIDAD DEL AGUA

Fuente: Laboratorio de Calidad del Agua



Anexo S. Resultados finales del análisis físico-químico de agua en el Laboratorio de Calidad del Agua de la ESPOCH

# ESPOCH

**LABORATORIO DE ANÁLISIS TÉCNICOS  
FACULTAD DE CIENCIAS**

Casilla 06-01-4703

Telefax: 2998 200 ext 332

Riobamba - Ecuador

## INFORME DE ANÁLISIS FINALES DE AGUAS

Análisis solicitado por: Jennifer Alexandra Orejuela Romero

Tipo de muestras: Agua de regadío contaminada con cromo (VI)

Localidad: Facultad de Recursos Naturales de la ESPOCH

### MUESTRA R1-A

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
pH	Und	4500-B	7.0
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1 020
Temperatura	°C	2550-A	18,3
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	540
Cromo (VI)	mg/L	8023	8,05
Dureza	mg/L	2340-C	328
Sal	‰	Potenciométrico	0,5

### MUESTRA R2-A

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
pH	Und	4500-B	7.1
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1 030
Temperatura	°C	2550-A	18,6
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	550
Cromo (VI)	mg/L	8023	7,95
Dureza	mg/L	2340-C	320
Sal	‰	Potenciométrico	0,5

### MUESTRA R3-A

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
pH	Und	4500-B	6.9
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1 030
Temperatura	°C	2550-A	18,2
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	545
Cromo (VI)	mg/L	8023	8,03
Dureza	mg/L	2340-C	334
Sal	‰	Potenciométrico	0,5

Fuente: Laboratorio de Calidad del Agua



**MUESTRA R1-B**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
pH	Und	4500-B	7,4
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1 100
Temperatura	°C	2550-A	18,5
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	600
Cromo (VI)	mg/L	8023	17,80
Dureza	mg/L	2340-C	352
Sal	‰	Potenciométrico	0,5

**MUESTRA R2-B**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
pH	Und	4500-B	7,3
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1 105
Temperatura	°C	2550-A	18,4
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	550
Cromo (VI)	mg/L	8023	17,65
Dureza	mg/L	2340-C	352
Sal	‰	Potenciométrico	0,5

**MUESTRA R3-B**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
pH	Und	4500-B	7,4
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1 108
Temperatura	°C	2550-A	18,2
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	550
Cromo (VI)	mg/L	8023	17,75
Dureza	mg/L	2340-C	352
Sal	‰	Potenciométrico	0,5

**MUESTRA R1-C**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
pH	Und	4500-B	7,9
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1 130
Temperatura	°C	2550-A	18,7
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	565
Cromo (VI)	mg/L	8023	28,90
Dureza	mg/L	2340-C	394
Sal	‰	Potenciométrico	0,5

Fuente: Laboratorio de Calidad del Agua

### MUESTRA R2-C

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
pH	Und	4500-B	7,8
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1 140
Temperatura	°C	2550-A	18,5
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	565
Cromo (VI)	mg/L	8023	29,10
Dureza	mg/L	2340-C	448
Sal	‰	Potenciométrico	0,5

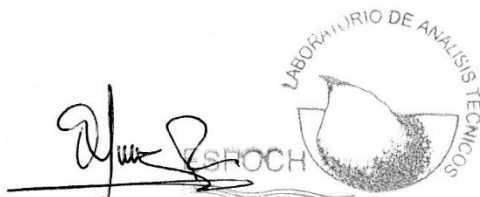
### MUESTRA R3-C

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
pH	Und	4500-B	7,9
Conductividad	µsiems/cm	2510-B	1 150
Temperatura	°C	2550-A	18,7
Sólidos Disueltos	mg/L	2540-D	580
Cromo (VI)	mg/L	8023	28,70
Dureza	mg/L	2340-C	400
Sal	‰	Potenciométrico	0,5

\*Métodos Normalizados. APHA, AWWA, WPCF 17 ed.

Observaciones:

Atentamente.



Dra. Gina Álvarez R.  
RESP. LAB. CALIDAD DEL AGUA

Fuente: Laboratorio de Calidad del Agua

Anexo T. Resultados del análisis químico del tejido vegetal en el Laboratorio de Calidad del Agua de la ESPOCH

# ESPOCH

## LABORATORIO DE ANÁLISIS TÉCNICOS FACULTAD DE CIENCIAS

Casilla 06-01-4703

Telefax: 2998 200 ext 332

Riobamba - Ecuador

### INFORME DE ANÁLISIS DE BIOMASA VEGETAL

Análisis solicitado por: Jennifer Alexandra Orejuela Romero

Tipo de muestras: Biomasa vegetal de la especie *Heliconia psittacorum*

Localidad: Facultad de Recursos Naturales de la ESPOCH

#### MUESTRA Aérea R1-A

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
Cromo (VI)	mg/Kg	8023-	1,38

#### MUESTRA Radicular R1-A

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
Cromo (VI)	mg/Kg	8023-	0,5

#### MUESTRA Aérea R2-A

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
Cromo (VI)	mg/Kg	8023	1,24

#### MUESTRA Radicular R2-A

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
Cromo (VI)	mg/Kg	8023	0,75

#### MUESTRA Aérea R3-A

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
Cromo (VI)	mg/Kg	8023	1,16

#### MUESTRA Radicular R3-A

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
Cromo (VI)	mg/Kg	8023	0,7

#### MUESTRA Aérea R1-B

Determinaciones	Unidades	*Método	Resultados
Cromo (VI)	mg/Kg	8023	1,26

Fuente: Laboratorio de Calidad del Agua

**MUESTRA Radicular R1-B**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
Cromo (VI)	mg/Kg	8023	0,8

**MUESTRA Aérea R2-B**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
Cromo (VI)	mg/Kg	8023	1,68

**MUESTRA Radicular R2-B**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
Cromo (VI)	mg/Kg	8023	0,5

**MUESTRA Aérea R3-B**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
Cromo (VI)	mg/Kg	8023	1,74

**MUESTRA Radicular R3-B**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
Cromo (VI)	mg/Kg	8023	0,38

**MUESTRA Aérea R1-C**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
Cromo (VI)	mg/Kg	8023	0,76

**MUESTRA Radicular R1-C**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
Cromo (VI)	mg/Kg	8023	0,28

**MUESTRA Aérea R2-C**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
Cromo (VI)	mg/Kg	8023	0,5

**MUESTRA Radicular R2-C**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
Cromo (VI)	mg/Kg	8023	0,37

**MUESTRA Aérea R3-C**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
Cromo (VI)	mg/Kg	8023	0,82

Fuente: Laboratorio de Calidad del Agua

**MUESTRA Radicular R3-C**

<b>Determinaciones</b>	<b>Unidades</b>	<b>*Método</b>	<b>Resultados</b>
Cromo (VI)	mg/Kg	8023	0,39

*\*Método Colorimétrico HACH.*

Observaciones:

Atentamente.



Dra. Gina Álvarez R.  
RESP. LAB. CALIDAD DEL AGUA

**Fuente:** Laboratorio de Calidad del Agua