



**Universidad Autónoma del Estado de México**  
**Facultad de Planeación Urbana y Regional**



**PROPUESTA DE UN SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN DE  
CROMO HEXAVALENTE EN AGUA, UTILIZANDO OLOTE  
DE MAÍZ.**

**TESIS**

**Que para obtener el título de:  
Licenciada en Ciencias Ambientales**

**Presenta:**

Jennifer Cortes Velázquez

**Directores**

M. en A. E. Ana Marcela Gómez Hinojos

Dr. en C. A. Eduardo Campos Medina

Julio, 2015

## DEDICATORIAS

### **A Dios:**

Por permitirme culminar esta etapa de mi vida,  
por llenarme de bendiciones en este camino,  
de paciencia y sabiduría.

### **A mis padres:**

Heriberto y Angélica, porque ellos han sido mi inspiración y mi motor, porque por ellos y para ellos es todo esto. Gracias por motivarme, por sus consejos, por apoyarme y estar conmigo en buenos y malos momentos, por cada una de sus enseñanzas y sobre todo les agradezco por su infinito amor. Este logro, también es de ustedes.

LOS AMO

### **A mi hermana:**

“Nena” gracias por tus consejos, la motivación que me brindaste, gracias por las risas compartidas contigo.

TE AMO

### **A mis amigas:**

Gracias por su amistad, por su apoyo y motivación, gracias por cada uno de esos momentos tan agradables que pasamos juntas a lo largo de la carrera.

LAS QUIERO

Por último, de igual manera dedico este trabajo a cada uno de mis familiares y de aquellas personas que también aportaron cosas que para mí fueron de gran relevancia las cuales permitieron que esta meta se viera concluida. Gracias por pertenecer a mi vida, por sus palabras de aliento y por su gran cariño.

## AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Autónoma del Estado de México** y a la **Facultad de Planeación Urbana y Regional**, por abrirme las puertas para formarme profesionalmente y por haber sido mi segunda casa en todo este tiempo.

### **A mis directores de Tesis:**

Al **Dr. en C.A. Eduardo Campos Medina**, por haberme aceptado como tesista en cuanto se lo propuse y por su apoyo en la realización de este trabajo de investigación. Gracias por facilitar la realización de los análisis químicos.  
A la **M. en A. E. Ana Marcela Gómez Hinojos**, gracias por su gran apoyo, por haber creído en mí, por su continua motivación para la culminación de esta tesis.

### **A mis revisores de Tesis:**

Al **M. en C. Jorge Paredes Tavares** y a la **M. en C. Adriana Guadalupe Guerrero Peñuelas**, por su disposición de tiempo y por su gran apoyo para la revisión de la presente tesis. Gracias por cada uno de sus comentarios, los cuales hicieron que el trabajo de investigación tuviera una mejora.

### **A mis Maestros:**

Gracias por sus enseñanzas, por su conocimiento y experiencias compartidas a lo largo de mi trayectoria académica. Por haber sido pilares clave para mi formación profesional y personal. Recordaré cada una de las aventuras vividas dentro de las aulas.

### **A la M. en A.P. Mariana Fabiola Rodríguez Flores:**

Jefa del Departamento de Evaluación Profesional, por su tiempo y atención prestada para la realización de los trámites correspondientes durante el proceso de Titulación.

## Índice

Resumen  
Introducción

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Esquema de la Investigación .....</b>   | <b>11</b> |
| Justificación .....  | 11        |
| Planteamiento del problema.....  | 12        |
| Objetivo General .....   | 15        |
| Objetivos Específicos .....  | 15        |
| Hipótesis .....  | 15        |
| Metodología .....  | 15        |
| Diagrama del diseño experimental .....   | 16        |
| <b>Capítulo 1: Antecedentes.....</b>   | <b>17</b> |
| 1.1 Soluciones a la problemática de Cr (VI).....                                 | 18        |
| 1.2 Caracterización del lote de maíz.....  | 22        |
| <b>Capítulo 2: Marco Teórico-Conceptual .....</b>                                | <b>24</b> |
| 2.1 Cromo Hexavalente .....  | 25        |
| 2.2 Analito.....   | 25        |
| 2.3 Adsorción.....   | 26        |
| 2.5 Bioadsorbente.....   | 26        |
| 2.6 Contaminación del agua .....   | 26        |
| 2.6.1 Fuentes de contaminación del agua.....                                     | 28        |
| 2.6.2 Clasificación de los compuestos presentes en el agua.....                  | 29        |
| 2.6.3 Principales contaminantes del agua .....                                   | 30        |
| 2.7 Contaminación en el agua por Cromo Hexavalente .....                         | 32        |
| 2.8 Efectos del Cromo Hexavalente.....   | 33        |
| 2.8.1 Efectos del Cromo sobre la salud.....                                      | 33        |
| 2.8.2 Efectos ambientales del Cromo.....   | 34        |
| 2.9 Purificación del agua.....   | 35        |
| 2.9.1 Métodos de Purificación del agua.....                                      | 36        |
| 2.10 Biofiltros.....   | 43        |
| 2.10.1 Definición de Biofiltro.....  | 43        |
| 2.10.2 Descripción del biofiltro de flujo horizontal.....                        | 44        |
| 2.10.3 Etapas de un sistema de biofiltro.....                                    | 46        |
| 2.10.4 Principales componentes de un biofiltro .....                             | 47        |
| 2.10.5 Recomendaciones para la operación y mantenimiento de los biofiltros ..... | 48        |
| 2.11 Tipos de biofiltros.....  | 49        |
| 2.11.1 Biofiltro de lecho fijo .....   | 50        |
| 2.11.2 Biofiltro de lecho escurrido .....  | 50        |
| 2.11.3 Biolavador .....  | 51        |
| 2.12 Ventajas de los sistemas de filtración biológica .....                      | 52        |
| 2.12.1 Beneficios económicos.....  | 52        |
| 2.12.2 Medioambientales .....  | 52        |
| 2.12.3 Sociales:.....  | 53        |

|  |            |
|--|------------|
| 2.13 Desventajas del biofiltro .....   | 53         |
| <b>Capítulo 3: Marco Normativo .....</b>                                       | <b>54</b>  |
| 3.1 Políticas Públicas sobre el agua .....                                     | 56         |
| 3.1.1 Nivel Federal .....  | 56         |
| 3.1.2 Nivel Estatal .....  | 64         |
| 3.1.3 Nivel Municipal .....  | 67         |
| 3.2 Marco Jurídico sobre la calidad y purificación del agua .....              | 69         |
| 3.2.1 Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 .....                           | 71         |
| 3.2.2 Norma Mexicana nmx-aa-044-scfi-2014 .....                                | 77         |
| 3.2.3 Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996 .....                           | 77         |
| <b>Capítulo 4: Metodología y Resultados .....</b>                              | <b>79</b>  |
| 4.1 Diagrama del diseño experimental .....                                     | 80         |
| 4.2 Desglose de Actividades .....  | 81         |
| 4.2.1 Recolección del Biomaterial .....  | 81         |
| 4.3 Preparación del Biomaterial .....  | 82         |
| 4.3.1 Secado .....   | 82         |
| 4.3.2 Trituración .....  | 83         |
| 4.3.3 Caracterización del Biomaterial .....                                    | 83         |
| 4.3.4 Preparación de las soluciones sintéticas de Cr (VI) y ajuste de pH ..... | 84         |
| 4.4 Fabricación de Biofiltro .....   | 85         |
| 4.5 Proceso de Filtración .....  | 86         |
| 4.6 Cuantificación de Cr (VI) y Cr (III) .....                                 | 87         |
| 4.6.1 Preparación del complejo difenilcarbazida-Cr (VI) .....                  | 87         |
| 4.6.2 Cuantificación del complejo difenilcarbazida-Cr (VI) .....               | 88         |
| 4.6.3 Cuantificación del Cromo trivalente .....                                | 89         |
| 4.7 Cuantificación de Cromo Hexavalente y Cromo Trivalente .....               | 89         |
| 4.8 Mecanismo de Reducción .....   | 96         |
| 4.8.1 Mecanismo de reducción de Cr <sup>6+</sup> .....                         | 97         |
| 4.8.2 Reducción de Cr <sup>6+</sup> en la celulosa .....                       | 97         |
| 4.8.3 Mecanismo de reducción de Cr <sup>6+</sup> en la hemicelulosa .....      | 98         |
| 4.9 Microscopía Electrónica de Barrido y Microanálisis (MEB) .....             | 100        |
| <b>Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones .....</b>                        | <b>103</b> |
| 5.1 Conclusiones .....   | 104        |
| 5.2 Recomendaciones .....  | 105        |
| <b>Bibliografía .....</b>  | <b>107</b> |

## Índice de Figuras

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 1.</b> Diagrama experimental de la investigación.....  | 14  |
| <b>Figura 2.1.</b> Sección longitudinal de un Biofiltro de flujo horizontal.....                           | 43  |
| <b>Figura 2.2.</b> Lecho Filtrante.....  | 46  |
| <b>Figura 4.1.</b> Diagrama experimental de la investigación con la adición de la técnica de MEB.....      | 79  |
| <b>Figura 4.2.</b> Lugar de recolección del biomaterial olote (San Lorenzo Huitzilapan.....                | 80  |
| <b>Figura 4.3.</b> Secado de mazorca sin desgranar.....  | 81  |
| <b>Figura 4.4.</b> Olote y mazorca.....  | 81  |
| <b>Figura 4.5.</b> Secado de olote.....  | 81  |
| <b>Figura 4.6.</b> Proceso de trituración del olote.....   | 82  |
| <b>Figura 4.7.</b> Olote triturado para el sistema de filtrado.....  | 82  |
| <b>Figura 4.8.</b> Soluciones sintéticas de Cr (VI).....   | 83  |
| <b>Figura 4.9.</b> Diagrama de predominio de especies del Cromo.....                                       | 84  |
| <b>Figura 4.10.</b> Diseño del Biofiltro.....  | 85  |
| <b>Figura 4.11.</b> Proceso de filtración.....   | 86  |
| <b>Figura 4.12.</b> Complejo formado por Cr (VI)-difenilcarbazida.....                                     | 87  |
| <b>Figura 4.13</b> Equipo de UV Lambda Perkin Elmer (Cuantificación de Cromo hexavalente).....             | 87  |
| <b>Figura 4.14.</b> Equipo absorción atómica (Cuantificación Cromo III y total.....                        | 88  |
| <b>Figura 4.15.</b> Diagrama de predominio de especies del Cromo.....                                      | 89  |
| <b>Figura 4.16.</b> Gráfica de reducción de Cr 6 <sup>+</sup> (concentración 0.05 mgL <sup>-1</sup> )..... | 92  |
| <b>Figura 4.17.</b> Gráfica de reducción de Cr 6 <sup>+</sup> (Concentración 0.1 mgL <sup>-1</sup> ).....  | 93  |
| <b>Figura 4.18.</b> Gráfica de reducción de Cr 6 <sup>+</sup> (Concentración 0.5 mgL <sup>-1</sup> ).....  | 94  |
| <b>Figura 4.19.</b> Gráfica de reducción de Cr 6 <sup>+</sup> (Concentración 1.0 mgL <sup>-1</sup> ).....  | 94  |
| <b>Figura 4.20.</b> Gráfica de reducción de Cr 6 <sup>+</sup> (Concentración 1.5 mgL <sup>-1</sup> ).....  | 95  |
| <b>Figura 4.21.</b> Reducción de Cr 6 <sup>+</sup> en la celulosa.....                                     | 97  |
| <b>Figura 4.22.</b> Mecanismo de reducción de Cr 6 <sup>+</sup> en la hemicelulosa.....                    | 98  |
| <b>Figura 4.23.</b> Propuesta de mecanismo de reducción de Cr6 <sup>+</sup> .....                          | 98  |
| <b>Figura 4.24.</b> MEB del biomaterial (olote) antes del proceso de filtración.....                       | 99  |
| <b>Figura 4.25.</b> MEB del biomaterial (olote) después del proceso de filtración.....                     | 100 |

## Índice de Tablas

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> Diferencias entre Cromo hexavalente y trivalente.....  | 11 |
| <b>Tabla 2.</b> Rebases de los límites máximos permisibles (LMP) de Cromo (VI) y fenoles de los sitios de monitoreo del curso alto del río Lerma (2012)..... | 12 |
| <b>Tabla 1.1.</b> Composición Química del olote.....   | 21 |
| <b>Tabla 2.1.</b> Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de purificación del agua.....   | 39 |
| <b>Tabla 2.2.</b> Clasificación de los biofiltros en función de la fase líquida y biológica.....   | 48 |
| <b>Tabla 2.3.</b> Ventajas y desventajas de los sistemas de biofiltración.....   | 50 |
| <b>Tabla 3.1.</b> Usos y descargas del agua en el municipio de Lerma.....  | 68 |
| <b>Tabla 3.1.</b> Límites permisibles de características bacteriológicas.....  | 73 |
| <b>Tabla 3.2.</b> Límites permisibles de características físicas y organolépticas.....   | 73 |
| <b>Tabla 3.3.</b> Límites permisibles de características químicas.....   | 74 |
| <b>Tabla 3.4.</b> Límites permisibles de características radiactivas.....  | 76 |
| <b>Tabla 3.5.</b> Límites máximos permisibles de contaminantes.....  | 77 |
| <b>Tabla 4.1.</b> Resultados de la concentración $0.05 \text{ mgL}^{-1}$ .....   | 90 |
| <b>Tabla 4.2.</b> Resultados de la concentración $0.1 \text{ mgL}^{-1}$ .....  | 90 |
| <b>Tabla 4.3.</b> Resultados de la concentración $0.5 \text{ mgL}^{-1}$ .....  | 90 |
| <b>Tabla 4.4.</b> Resultados de la concentración $1.0 \text{ mgL}^{-1}$ .....  | 91 |
| <b>Tabla 4.5.</b> Resultados de la concentración $1.5 \text{ mg L}^{-1}$ .....   | 91 |

## Resumen

El objetivo principal de esta investigación fue llevar a cabo una bioadsorción del Cr (VI) presente en soluciones sintéticas, utilizando un sistema de filtración biológica con olote de maíz, de la comunidad de San Lorenzo Huitzilapan. El sistema de biofiltración fue construido en dos etapas en la que cada una contenía el biomaterial, las soluciones preparadas a diferentes concentraciones de Cr (VI) se hicieron pasar por el sistema de doble biofiltración, posteriormente se llevó a cabo la cuantificación del Cr (VI) en las soluciones obtenidas, utilizando la técnica de Espectrofotometría de UV y de Absorción Atómica, con los resultados obtenidos de ambas técnicas se pudo comprobar que el Cr (VI) no fue adsorbido en su totalidad por el olote, sino que una parte importante se había reducido a Cr (III).



## Introducción

Uno de los mayores retos a los que se enfrenta la humanidad en el siglo XXI es el tener acceso a suficiente agua limpia. El agua se está convirtiendo, en muchas regiones del mundo, en un factor limitante para la salud humana, la producción de alimentos, el desarrollo industrial y el mantenimiento de los ecosistemas naturales y su biodiversidad, e incluso para la estabilidad social y política (Julia & Rosalva, 2005).

Diversas instituciones e investigadores han considerado que los metales pesados son los principales contaminantes en este siglo (Mohan & Pittman, 2006). La contaminación del medio ambiente por estos elementos es un serio problema mundial que ha atraído la atención de diversos sectores de la sociedad.

Los metales pesados son elementos químicos que tienen una densidad mayor a  $5 \text{ g cm}^{-3}$ , no son biodegradables, se acumulan en el ambiente, son altamente reactivos, persistentes y tóxicos, incluso a bajas concentraciones, por lo que se les considera un gran peligro para la estabilidad del medio ambiente y la salud pública (Das, et al., 2008). Entre los diferentes metales pesados que se descargan al medio ambiente a través de diversos efluentes industriales, el Cromo [Cr] es uno de los más tóxicos (Park, et al., 2008). Las formas más comunes de este elemento son el Cromo metálico [Cr (0)], Cromo Trivalente [Cr (III)] y Cromo Hexavalente [Cr (VI)], aunque puede existir en nueve diferentes estados de oxidación (Mohan & Pittman, 2006).

Es por ello que la finalidad de este trabajo de investigación es adsorber la mayor cantidad de Cr (VI) presente en soluciones acuosas preparadas a diferentes concentraciones, con la ayuda del biomaterial olote. Para llevar a cabo esta investigación este trabajo se divide en 5 capítulos:

En el Capítulo 1, se abordará sobre los antecedentes de procesos de bioadsorción realizados y tecnologías que se han implementado para la remoción de metales pesados.

En el Segundo Capítulo el Marco Teórico-Conceptual incluirá todo los conceptos teóricos relacionados con la investigación, así como también se definirán algunos términos que ayudarán a una mayor comprensión sobre el tema.

En el Capítulo 3 se desglosa todo lo que se refiere al Marco Normativo de la legislación existente en México que regula la contaminación del agua, así como las normas existentes sobre el Cromo en el agua, algunas de estas normas son: NOM-127-SSA1-1994. *“Salud ambiental, agua para uso y consumo humano- límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”*. NMX-AA-044-SCFI-2014 *“Análisis de agua.- medición de Cromo hexavalente en aguas naturales, salinas, residuales y residuales tratadas- método de prueba”*.

En el Capítulo 4 se analizarán y explicarán los resultados obtenidos en el desarrollo de la presente investigación.

Y finalmente en el Quinto capítulo se darán las conclusiones y recomendaciones pertinentes sobre el desarrollo del trabajo realizado.

## Esquema de la Investigación

### Justificación

Debido a la creciente explosión demográfica, la escasez y el deterioro de la calidad del agua, la salud y el bienestar de la población en países en vías de desarrollo se ha visto afectada. Actualmente, en las regiones de África, Asia, América Latina y el Caribe, el agua dulce se encuentra en una inadecuada calidad y cantidad, este es uno de los problemas más críticos que enfrenta la humanidad; se está extrayendo agua de los ríos, lagos y acuíferos más rápidamente de lo que demoran en renovarse. Otra gran problemática es la contaminación, que afecta significativamente la calidad del agua (Anaya, 2011).

Hoy en día la contaminación del agua se ve afectada directamente a causa de la presencia de algunos metales pesados como el Cadmio, Mercurio, Plomo, Zinc, Cromo, entre otros. Para fines de esta investigación solo se hablará acerca del Cromo Hexavalente.

El Cromo es el sexto metal de transición más abundante en la naturaleza. Existe en nueve estados de oxidación (del -2 al +6), aunque los más estables en el ambiente natural son el Cromo Hexavalente [Cr (VI)] y el Cromo Trivalente [Cr (III)], los cuales difieren significativamente en sus propiedades fisicoquímicas y en su reactividad biológica. Asimismo, el Cromo es uno de los metales pesados más ampliamente utilizados en los procesos industriales y uno de los contaminantes más frecuentes encontrados en algunos cuerpos de agua, en el suelo y en el aire (WHO,2003).

Como ya se mencionó, Cr (VI) es sumamente tóxico para la salud humana, es por ello que es de vital importancia contar con biotecnologías que ayuden a la remoción de este metal cuando esté contenido en el agua. Es por esta razón que el presente trabajo de investigación tiene como finalidad adsorber este metal a través de un sistema de filtración biológica donde el elemento principal será el olote de maíz.

Este sistema de filtrado será diseñado con materiales de fácil acceso y de bajo costo, con la finalidad de que pueda ser implementado en campo, es decir que su utilización pueda llevarse a cabo dentro de casas habitación.

Las casas habitación donde se tiene pensado implementar este sistema, se encuentran en la comunidad de San Lorenzo Huitzilapan, la cual pertenece al municipio de Lerma. En esta comunidad, una de las actividades que llevan a cabo es la siembra de maíz, y en tiempo de cosechas la adquisición del olote de maíz es significativa, pero en este lugar, el material se utiliza como desecho o como combustible, es por ello que se pensó en que se le diera otra utilidad, y que este residuo del maíz se utilizara para el sistema de filtración biológica, y los comuneros le den otro uso y se vean beneficiados.

### **Planteamiento del problema**

Actualmente se ha establecido que diversos compuestos de Cromo, en forma de óxidos, cromatos y dicromatos, son contaminantes ambientales presentes en agua, suelos y efluentes de industrias, debido a que dicho metal es ampliamente utilizado en distintas actividades manufactureras, tales como cromado electrolítico, fabricación de explosivos, curtido de pieles, aleación de metales, fabricación de colorantes y pigmentos, etc. El Cromo se encuentra presente en agua y suelo principalmente en dos estados de oxidación: Cr (III) o Cr (VI), aunque también puede encontrarse como óxido de Cromo, sulfato de Cromo, trióxido de Cromo, ácido crómico y dicromato (Zouboulis, et al., 1995).

El Cromo (III) es un elemento esencial para organismos que puede interferir en el metabolismo del azúcar y causar problemas de corazón, cuando la dosis es muy baja. El Cromo (VI) es mayoritariamente tóxico para los organismos. Este puede alterar el material genético y causar cáncer.

En presencia de materia orgánica, el Cr (VI) en solución es reducido a Cr (III), lo cual reduce de manera significativa su toxicidad; sin embargo, altas

concentraciones del ión en estado hexavalente pueden sobrepasar esta capacidad de reducción, lo que impediría su adecuada eliminación (Cervantes, et al., 2001).

Pese a que el Cromo es un elemento esencial para animales, altas concentraciones del metal (15 µg/L en agua de ríos y 0.10 mg /L en agua potable) resultan tóxicos. En las aguas residuales, el Cr (VI), se encuentra en solución como  $\text{CrO}_4^{2-}$  (Cotton & Wilkinson, 1980), puede removerse por reducción, precipitación química, adsorción e intercambio iónico, y actualmente, el proceso más utilizado es la adición de un agente reductor que convierta el Cr (VI) a Cr (III) y posteriormente se le precipita con soluciones básicas a  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  (Cervantes, et al., 2001).

**Tabla 1. Diferencias entre Cromo Hexavalente y Trivalente**

| Hexavalente  | Trivalente   |
|--|--|
| -Sumamente tóxico.   | -Mínima toxicidad.   |
| -Es altamente soluble en agua.   | -Es insoluble en agua.   |
| -Su contacto puede causar ulceración de las vías respiratorias y otros tejidos, así como problemas dérmicos, gastrointestinales y reproductivos. | -No es considerado un agente cancerígeno en humanos.   |
| -Debe manejarse con extremo cuidado, con equipo y condiciones adecuadas.   | -Debe manejarse con precaución, ya que cada metal, dependiendo de la dosis y vía de exposición, es capaz de causar daño al ser humano. |

Fuente: Ciencia y desarrollo (2008).

De manera más local, la problemática por los diferentes metales pesados (entre ellos el Cromo hexavalente) a lo que son cuerpos de agua, se ve reflejado en la contaminación del río Lerma. La contaminación del agua en la Cuenca Alta del Río Lerma (CARL), ha sido el tema fundamental de diversos diagnósticos, planes de manejo, tesis, estudios técnicos y de investigación, por mencionar sólo algunos. Todos ellos señalan lo que ya es bien conocido, el río Lerma sufre un grave y acelerado proceso de deterioro originado fundamentalmente por la gran

cantidad de aguas residuales sin tratamiento que en él se vierten. Esta situación ha llevado a considerarlo uno de los ríos más contaminados del país.

En la tabla 2 se muestran los rebases a los límites máximos permisibles de Cromo hexavalente y fenoles en el curso alto del río Lerma.

**Tabla 2. Rebases de los límites máximos permisibles (LMP) de Cromo (VI) y Fenoles de los sitios de monitoreo del Curso Alto del río Lerma (2012).**

| Nombre                                    | Cromo hexavalente LMP = 0.05 mg/L (1) | Fenol LMP = 0.001 mg/L (2) |
|---|---------------------------------------|----------------------------|
| Drenaje de Tenango                        | Menor a 0.09                          | Menor a 0.1                |
| Drenaje Arroyo Mezapa                     | Menor a 0.09                          | Menor a 0.1                |
| Drenaje de Chapultepec                    | Menor a 0.09                          | Menor a 0.1                |
| Drenaje de Ocoyoacac                      | Menor a 0.09                          | Menor a 0.1                |
| Drenaje A de Metepec y San Mateo          | Menor a 0.09                          | Menor a 0.1                |
| Drenaje B de Metepec y San Mateo          | Menor a 0.09                          | Menor a 0.1                |
| Drenaje de Ameyalco                       | Menor a 0.09                          | Menor a 0.1                |
| Descarga Arroyo Totoltepec-Toluca Oriente | Menor a 0.09                          | Menor a 0.1                |
| Río Xonacatlán                            | Menor a 0.09                          | Menor a 0.1                |
| Descarga de planta Toluca Norte           | 0.057                                 | 0.15                       |
| Río Santa Catarina                        | Menor a 0.09                          | Menor a 0.1                |
| Descarga Parque Toluca 2000               | 0.06                                  | 0.18                       |
| Río San Lorenzo                           | 0.053                                 | Menor a 0.1                |
| Río Verdiguél                             | Menor a 0.09                          | Menor a 0.1                |
| Río Tejalpa                               | Menor a 0.09                          | Menor a 0.1                |
| Río Temoaya                               | Menor a 0.09                          | Menor a 0.1                |

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente (2012)

(1) Valor para fuente de abastecimiento de agua potable, según el Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89 (DOF, 1989).

(2) Valor para fuente de abastecimiento para uso público urbano, según la Ley Federal de Derechos (DOF, 2008).

## **Objetivo General**

Llevar a cabo un proceso de bioadsorción del Cr (VI) presente en soluciones sintéticas, utilizando un sistema de filtración biológica con olote de maíz.

## **Objetivos Específicos**

- ❖ Eliminar la mayor cantidad de Cr (VI) presente en el agua.
- ❖ Conocer la capacidad de adsorción del biomaterial (olote)
- ❖ Comparar los datos obtenidos de la adsorción de Cr (VI) con los parámetros que establece la NOM-127-SSA1-1994. *“Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”.*

## **Hipótesis**

Mediante la implementación de un biofiltro a base de olote de maíz, se adsorberá la mayor cantidad de Cromo (VI) presente en las soluciones sintéticas y se cumplirá con los límites establecidos en la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994.

## **Metodología**

El enfoque de la investigación de la tesis es cuantitativo y experimental (Hernández, et al., 2003), ya que se estará analizando el comportamiento de las soluciones preparadas en el laboratorio de Cromo (VI) a diferentes concentraciones al estar en contacto con el biomaterial. Por otra parte conocer la capacidad que tiene el biomaterial para la remoción de Cromo (VI). Una vez obtenidos los datos de adsorción se procederá a la interpretación de resultados, con la finalidad de evaluar el trabajo realizado por el biomaterial.

Con lo anterior se puede decir que el diseño de la investigación a realizar es de tipo experimental verdadero (Hernández, et al., 2003), porque se estará acudiendo a la ayuda de equipo de laboratorio, los cuales son: UV Lambda Perkin Elmer para la cuantificación del Cromo hexavalente y la Adsorción Atómica.

## Diagrama del diseño experimental

En este apartado se describirán cada una de las actividades que se llevarán a cabo para realizar la presente investigación, las cuales quedan representadas en la figura 1.

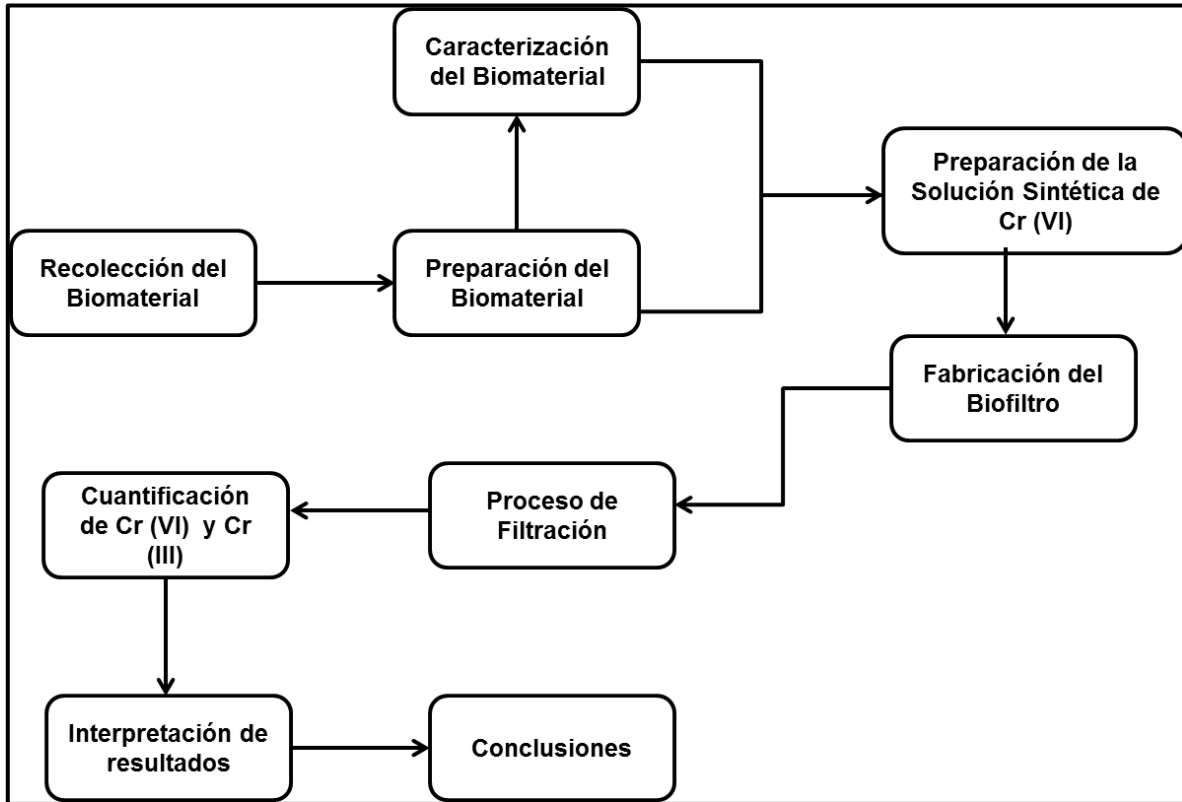


Figura 1. Diagrama experimental de la investigación

Fuente: Elaboración Propia, 2015



# Capítulo 1: Antecedentes

En este capítulo se mencionaran algunos de los trabajos que se han realizado para la remoción, reducción o adsorción de Cr (VI) y de algunos otros metales, en donde de igual manera se utilizaron diferentes biomateriales. Por otro lado también dentro de este capítulo se mencionan los principales elementos que componen al biomaterial, olote de maíz.

### **1.1 Soluciones a la problemática de Cr (VI)**

Recientemente, se ha estudiado el aislamiento de microorganismos resistentes y su capacidad de remoción y/o reducción de Cr (VI), a partir de sitios contaminados con el metal, como la bacteria *Staphylococcus Saprophyticus* (Ilham, et al., 2004), las levaduras *Candida sp.* (Guillén, et al., 2009), *Candida maltosa* (Ramírez, et al., 2004), y los hongos filamentosos *Penicillium sp.* (Acevedo, et al., 2006), *Trichoderma inhamatum* (Morales & Urbina, 2008). Por otro lado, también se han utilizado materiales de desecho, como residuos industriales agrícolas o urbanos para la eliminación y/o recuperación de metales pesados de efluentes industriales contaminados, entre los que se encuentran: residuos de manzana (Lee, et al., 1998), corteza de árbol (Sarin & Pant, 2006), cáscara de avellana (Cimino, et al., 2000), cáscara de mandarina y naranja (Pavan, et al., 2006), por lo que es de gran interés analizar otros materiales de desecho y por lo tanto económicos, para tratar de eliminar el Cromo (VI) de aguas y suelos contaminados, así como la biorremediación de los mismos, como el Tamarindo (*Tamarindus indica*), del cual se ha descrito su capacidad de bioadsorción de Cromo (VI) utilizando las semillas (Agarwal, et al., 2006), y la cáscara tratada con HCl y ácido oxálico (Popuri, et al., 2007), con resultados satisfactorios.

Otros trabajos realizados con respecto a la remoción de Cr (VI) son los siguientes:

- a) **Bioadsorción de Cromo (VI) por la cáscara de mamey (*Mammea Americana L.*)**. En esta investigación se analizó la capacidad de remoción de Cromo (VI) en solución por cáscara de mamey, determinando la concentración del metal por el método de la Difenilcarbazida, encontrando

que la remoción total del metal (100 mg/L) ocurre a los 50 minutos, a pH de 1.0 y 28°C. Con respecto a la temperatura, la más alta remoción se observó a 60°C, pues a los 12 minutos, el metal (1 g/L) se remueve completamente. En las concentraciones de Cr (VI) analizadas, la cáscara de mamey, mostró gran capacidad de remoción; además, remueve eficientemente el metal in situ, (95 % de remoción, 7 días de incubación, 5 g de biomasa), y después de 1h de incubación, la biomasa estudiada disminuye 1.0 g de Cr (VI) con la producción simultánea de Cr (III), por lo que puede utilizarse para eliminarlo de aguas residuales industriales (Acosta, et al., 2012).

- b) Adsorción de Cromo Hexavalente en la cáscara de arroz modificada químicamente.** En este trabajo se analizaron los factores cinéticos que afectan la adsorción de Cromo (VI) en solución empleando como bioadsorbente la cáscara de arroz modificada químicamente, con hidróxido de potasio 1% m/m o con ácido fosfórico 1M. Se estudió la adsorción de Cromo (VI) considerando los siguientes parámetros pH, tiempo de incubación, masa del bioadsorbente y concentración inicial del tóxico. La determinación de Cromo hexavalente y total se realizó por el método de la difenilcarbazida y por espectrofotometría de absorción atómica, respectivamente. El tratamiento químico con hidróxido de potasio o con ácido fosfórico de la cáscara de arroz produjo un aumento en la adsorción del tóxico (Eggs, et al., 2012).
- c) Remoción de Cromo Hexavalente y Cromo total por la corteza de *pyrus communis*.** El objetivo principal de este trabajo fue evaluar la remoción de Cromo hexavalente [Cr (VI)] y Cromo total por la corteza de *Pyrus communis*. Se encontró que en las primeras 24 h de contacto la corteza fue capaz de disminuir la concentración de Cr (VI) y Cromo total desde 102 mg l<sup>-1</sup> hasta 20.43 y 39.63 mg l<sup>-1</sup>, respectivamente. Subsecuentemente, las concentraciones continuaron disminuyendo lentamente hasta alcanzar valores de 0.91 mg de Cr (VI) l<sup>-1</sup> y 31.26 mg de Cromo total l<sup>-1</sup> a las 120 h. Durante todo el periodo experimental se detectó la presencia de Cromo trivalente [Cr (III)] en la solución acuosa, lo que

ocasionó que la concentración de Cromo total residual fuera superior a la de Cr (VI) residual. Estos resultados indican que la corteza de *Pyrus communis* fue capaz de biotransformar al menos parte del Cr (VI) inicialmente adicionado a la solución acuosa a Cromo trivalente [Cr (III)] (Netzahuatl, et al., 2010).

- d) Remoción de Cr (VI), Cr (III) y Fe (III) generados electroquímicamente en soluciones acuosas, por medio de *Ectodermis de Opuntia*.** En esta investigación la remoción de Cromo Hexavalente se llevó a cabo a través de la técnica de adsorción en donde se utilizó cáscara de Tuna (*Ectodermis de Opuntia*) como sorbente, la cual se secó y se molió para posteriormente ponerse en contacto con soluciones de Cr (VI) y Cr(VI)-difenilcarbazida (DFC), ya que este compuesto orgánico es utilizado para cuantificar colorimetricamente este ión, asimismo también se puso en contacto con soluciones de los mismos analitos tratados electroquímicamente, lo cual generó iones Cr (III) y Fe (III). Los porcentajes de sorción de estos iones son alrededor del 50% para el caso de Cr (VI) y Cr (VI)-DFC, pero para el Cr (III) y Fe (III) los porcentajes alcanzados son bajísimos debido a la presencia de la difenilcarbazida (Campos & Barrera, 2008).
- e) Remoción de Cromo Hexavalente y Cromo total de soluciones acuosas por el raspón de la uva.** El objetivo principal de este trabajo fue evaluar el potencial del raspón de la uva para remover Cromo hexavalente [Cr (VI)] y Cromo total de soluciones acuosas. Se encontró que el raspón de la uva disminuyó rápidamente las concentraciones de Cr (VI) y Cromo total durante las primeras 24 h de contacto; posteriormente las concentraciones continuaron disminuyendo, pero a menor velocidad. A todos los tiempos de contacto ensayados, la capacidad de remoción de Cr (VI) fue mayor a la de remoción de Cromo total, lo que sugiere que el raspón de la uva redujo químicamente parte del Cr (VI) inicialmente presente en la solución acuosa a Cromo trivalente [Cr (III)]. A las 120 h de contacto se alcanzaron los valores más altos de capacidad de remoción de Cr (VI) y Cromo total, siendo estos de 102 y 53,66 mg g<sup>-1</sup>, respectivamente (Pineda, et al., 2011).

- f) Remoción de Cromo Hexavalente por el Hongo *Paecilomyces sp.* Aislado del Medio Ambiente.** En esta investigación para la remoción de Cromo hexavalente se trabajó con una cepa identificada como *Paecilomyces sp.* La biomasa fúngica remueve eficientemente Cromo (VI) en solución y puede utilizarse para descontaminar nichos acuáticos contaminados, ya que 1 g de biomasa fúngica remueve 100 y 1000 mg/100 mL del metal a una y tres horas de incubación, y elimina totalmente 297 mg Cr(VI)/g de tierra contaminada (Cárdenas & Acosta, 2010).
- g) Reducción de Cromo Hexavalente contenido en aguas residuales mediante un tratamiento biológico.** En esta investigación lo que utilizaron para la reducción de Cr (VI) fue utilizando el microorganismo *Pseudomonas fluorescens*, por sus características de sobrevivencia en sitios contaminados con metales pesados, en donde también los resultados fueron exitosos; ya que el tratamiento biológico al que fue sometida el agua residual, tuvo los efectos esperados de reducción de la valencia del Cromo, así como también consecuencias propias del microorganismo utilizado, como son la floculación de la materia orgánica y la disminución de los malos olores por la eliminación de grasas del medio (Flores, et al., 2007).
- h) Reducción de Cr (VI) utilizando Fructosa, Glucosa y Sacarosa.** En este trabajo se buscó transformar el Cr (VI) el cual representa un grave riesgo para la salud debido a su alta toxicidad, a una forma que representa un menor riesgo para la salud, el Cr (III). Para ello, se realizaron pruebas con diversos azúcares como son la glucosa, fructuosa y sacarosa con el fin de comprobar su utilidad en la reducción de este metal, además de observar el efecto del pH, la temperatura y la concentración, en las condiciones óptimas de reducción (Balderas, et al., 2007).
- i) Remoción de Zinc y Cobre con *Zea Mays*, modificado con NaOH en soluciones acuosas.** Este trabajo se centró en realizar el estudio preliminar de la adsorción del biosorbente raquis de *Zea mays*, mediante el uso de las técnicas MEB e IR, para evaluar su uso potencial en la remoción de los metales pesados, comprendiendo el proceso de modificación del *Zea*

mays, la determinación del pH adecuado para la adsorción, la determinación de la longitud de onda para cuantificar la concentración de los metales contenidos en las soluciones, la determinación de las cinéticas y las isotermas de adsorción y el ajuste de los resultados a los modelos correspondientes (Carreño, 2014).

- j) Remoción de Pb (II) con tallos de maíz (*Zea Mays*).** En esta investigación reportan la eliminación de Pb (II) con tallos de maíz (*Zea mays*) y demostraron que el modelo cinético de pseudo-segundo orden fue el que mejor representó el proceso, con una capacidad de adsorción máxima de 80mg/g y un pH óptimo de 6. (García & Colín, 2010).
- k) Carbones activados a partir de bagazo de caña de azúcar y zuro de maíz para la adsorción de Cadmio y Plomo.** Se prepararon carbones activados con bagazo de caña de azúcar (BC) y zuro de maíz (ZM) para adsorber cadmio y plomo. BC y ZM fueron carbonizados a 400°C por 1 hora, activados con ácido fosfórico y modificados con ácido nítrico o peróxido de hidrógeno y posterior calentamiento. La activación aumentó el área superficial de los carbones (5 m<sup>2</sup>/g a 778 m<sup>2</sup>/g para el ZM y 3 m<sup>2</sup>/g a 369 m<sup>2</sup>/g para BC). Los grupos oxigenados se analizaron por IR-DRIFTS. La acidez de los carbones estuvo entre 1.36 y 2.12 meq/g, el pH entre 2.9 y 6.5, y las capacidades de intercambio iónico hasta 0.070 meq/g (adsorción atómica). La mayor adsorción de Cd y Cd en presencia de Pb la mostró ZM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y la mayor adsorción de Pb y Pb en presencia de Cd la presentaron ZM-A y ZM-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Primera, et al., 2011).

## 1.2 Caracterización del olote de maíz

El olote del maíz se encuentra entre las fuentes de recursos no maderables con un alto contenido de xilanas, por lo que ha sido considerado de interés como fuente alternativa de diferentes compuestos químicos de interés comercial o industrial, entre otras fuentes de biomasa (Córdoba, 2010). El olote es un residuo o subproducto agrícola que se genera en grandes cantidades en el proceso de

separación del grano de la mazorca y se estima que por cada tonelada de maíz se obtienen 170 kg de olote (CIMMYT, 1995).

De datos recientes sobre la producción mundial de maíz en el 2010 (844 millones de toneladas) puede estimarse que se generan alrededor de 144 millones de toneladas de olote por año (FAOSTAT, 2012).

En este sentido, el uso o aplicación química del olote ha estado muy restringido debido a la dificultad que existe para acceder a sus componentes (carácter recalcitrante) e incompleta caracterización química, así como la valoración de sus principales productos (lignina, celulosa y hemicelulosas). Estos aspectos han limitado su utilización y conducido a la quema del olote como recurso o al esparcimiento de sus residuos a la intemperie, generando un problema de contaminación ambiental. Entre los usos del olote que han sido reportados en la literatura se encuentran la aplicación como forraje para rumiantes, soporte para disminuir la erosión en la tierra y también como sustratos para la producción de la enzima xilanasa (Knob & Cano, 2010).

En la Tabla 1.1 se muestran los principales componentes del olote, según cuatro trabajos de investigación.

**Tabla 1.1 Composición química del olote**

| Componentes (%)       | (Córdoba <i>et al</i> , 2007) | (Garrote <i>et al</i> , 2007) | (Rivas <i>et al</i> , 2004) | (Thompson, 1995) |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------|
| <b>Hemicelulosa</b>   | 33.6                          | 31.1                          | 39.0                        | 33.7 - 41.2      |
| <b>Celulosa</b>       | 45+<br>50++                   | 34.3                          | 34.3                        | 30.0 – 41.7      |
| <b>Lignina Klason</b> | 15.8                          | 18.8                          | 14.4                        | 4.5 – 15.9       |
| <b>Cenizas</b>        | 2.0                           | No reporta                    | No reporta                  | No reporta       |

+ (Determinado según Timell, 1961); ++ (Determinado según Tappi 9m, 1954).

# **Capítulo 2: Marco Teórico-Conceptual**



Dentro de este capítulo se hablará sobre algunos tópicos que son de relevancia para la investigación y se hace con la finalidad de una mejor comprensión del presente trabajo.

## **2.1 Cromo Hexavalente**

El Cromo fue descubierto en 1797 por el químico francés Louis Vauquelin, quien le dio el nombre de Cromo (del griego *chroma*, “color”), en función de los diversos colores que es posible extraer de los compuestos que forman este elemento. El Cromo ocupa el vigésimo primer lugar en abundancia sobre la tierra (alrededor de 122 ppm) y es el sexto metal de transición más abundante (Mohan & Pittman, 2006).

El [Cr (VI)] es la forma más tóxica de este metal, ya que es un potente oxidante de la materia orgánica, es sumamente carcinogénico, mutagénico y teratogénico. Se ha demostrado que es 100 veces más tóxico y 1000 veces más mutagénico que la forma trivalente (Guillén, et al., 2009). Actualmente el Cr (VI) se considera un contaminante prioritario en muchos países (Wang, 2000).

## **2.2 Analito**

Es un término utilizado sobre todo en la química analítica, análisis químico, etc, donde hace referencia a una sustancia, la cual puede ser un ion, un elemento, o incluso un compuesto determinado, que posee un interés en una muestra, pues es la parte que se desea analizar. Dicha especie química, puede conocerse y ser cuantificada, al pasar a determinar su cantidad en una muestra, además de su concentración, en un proceso químico determinado, como suelen ser las valoraciones químicas, siguiendo una particular forma de medida química (Química, 2000).

### **2.3 Adsorción**

El fenómeno de adsorción es el proceso por el cual átomos o moléculas de una sustancia que se encuentra en determinada fase, son retenidas en la superficie de otra sustancia, que se encuentra en otra fase. Como resultado de este proceso, se forma una capa de líquido o gas en la superficie de una sustancia sólida o líquida.

La adsorción puede definirse como la tendencia de un componente del sistema a concentrarse en la interfase, donde la composición interfacial es diferente a las composiciones correspondientes al seno de las fases (Química, 2000).

### **2.4 Biomateriales**

Son materiales farmacológicamente inertes, utilizados para ser incorporados o implantados dentro de un sistema vivo para reemplazar o restaurar alguna función permaneciendo en contacto permanente o intermitente (Química, 2000).

### **2.5 Bioadsorbente**

Es un sólido natural que tiene la capacidad de retener sobre su superficie un componente presente en corrientes líquidas o gaseosas. Se caracterizan por una alta superficie específica y por su inercia química frente al medio en el que se van a utilizar. (Química, 2000).

### **2.6 Contaminación del agua**

Por contaminación de agua entendemos la adición de sustancias a un cuerpo de agua que deteriora su calidad, de forma tal que deja de ser apto para el uso que fue designado. La materia extraña contaminante puede ser inerte como los compuestos de plomo o mercurio o viva como los microorganismos. En su sentido amplio, podemos definir contaminación de agua como: hacer que las aguas no sean aptas para algún uso particular. El agua no es pura en su estado natural dado que contiene pequeñas cantidades de sales minerales disueltas y otras

sustancias o elementos que contribuyen a darle gusto. El agua es el medio líquido universal para la materia viva y, por consiguiente, es también propensa a la contaminación por organismos vivos que producen enfermedades en el hombre (Protección Civil, 2011).

Según la Carta del Agua Consejo de Europa, 1968: “La contaminación del agua; consiste en una modificación, generalmente, provocada por el hombre, de la calidad del agua, haciéndola impropia o peligrosa para el consumo humano, la industria, la agricultura, la pesca y las actividades recreativas, así como para los animales domésticos y la vida natural”.

La calidad del agua puede definirse como una aptitud para los usos beneficiosos como bebida del hombre y de los animales, para soporte de una vida marina sana, para riego de la tierra y para recreación. La materia extraña podrá ser materia inerte, como los compuestos de Plomo o Mercurio, o materia viva, como los microorganismos (Protección Civil, 2011).

Por lo tanto la contaminación del agua es la adición a la misma de materia extraña indeseable que deteriora su calidad, por lo que los medios de contaminación son aquellos que implican procesos de suspensión, disolución, y un cambio bioquímico que deterioran la mencionada calidad y que son procesos complejos que sólo pueden tener lugar en el agua, dadas sus características (Protección Civil, 2011).

Actualmente se cuentan con algunas tecnologías y métodos para determinar si la calidad del agua es adecuada o no, todo depende también del uso que se le vaya a dar, como ya se mencionó anteriormente. Estos métodos son necesarios para conocer y cuantificar las sustancias que se encuentran presentes en este líquido, ya que existen unas muy precisas con las cuales se puede saber si el agua está en buen estado o no, otra respuesta la podemos encontrar en la cantidad con la que se presentan estas sustancias dañinas y que al fin y al cabo son las encargadas de modificar la composición química del agua. Es por ello que hoy en día la mayor preocupación sobre la seguridad del agua es ahora la presencia potencial de contaminantes químicos (Gray, 1996).

Estos contaminantes pueden incluir productos químicos orgánicos e inorgánicos y metales pesados, procedentes de fuentes industriales, agrícolas y de la escorrentía urbana.

### **2.6.1 Fuentes de contaminación del agua**

#### **1) Primera Clasificación**

**a) Fuentes naturales:** Dependiendo de los terrenos que atraviesa el agua puede contener componentes de origen natural procedentes del contacto con la atmósfera y el suelo (Ej. Sales minerales, calcio, magnesio, hierro etc.). Aunque pueden ser nocivos para la salud, en general son sustancias que se pueden identificar fácilmente y eliminar (Echarri, 2007).

**b) Fuentes artificiales:** Producidas como consecuencia de las actividades humanas. El desarrollo industrial ha provocado la presencia de ciertos componentes que son peligrosos para el medio ambiente y para los organismos y difíciles de eliminar (Echarri, 2007).

#### **2) Segunda clasificación**

**a) Fuentes puntuales:** Son todas aquellas que entran al ambiente por un solo punto de entrada, que se identifica fácilmente. Un ejemplo de fuente puntual sería una fuga de agua de alcantarillado. Las fuentes puntuales suelen ser aquellas directamente identificadas por sus orígenes de actividades humanas (Stanley, 2007).

**b) Fuentes no puntuales:** Las fuentes no puntuales de contaminación son aquellas que se reparten en áreas más extensas. El agua contaminada con fertilizante proveniente de la tierra agrícola fertilizada o el agua contaminada con exceso de álcali lixiviado de tierras alcalinas son ejemplos de estas fuentes. Las fuentes no puntuales son relativamente más difíciles de identificar y controlar (Stanley, 2007).

### **2.6.2 Clasificación de los compuestos presentes en el agua**

La barrera entre qué es contaminante y qué es un compuesto benéfico, muchas veces es cuestión de la cantidad en la cual se encuentra una sustancia, valor que no es universal para los seres vivos o usos del agua (Cisneros, 2001).

1) De acuerdo con su naturaleza, se distinguen los contaminantes en químicos, biológicos y físicos.

**a) Químicos:** los compuestos químicos provienen de los drenados de minas, desechos solubilizados de la agricultura, derrames de petróleo, pesticidas, aguas residuales municipales, desechos líquidos industriales y compuestos radiactivos (Cisneros, 2001). Los compuestos químicos, producen efectos diversos y pueden ser de origen natural o sintético. Algunos son desechados directamente, otros, se forman por la reacción entre diferentes compuestos en el agua y, por último, una pequeña fracción se forma durante el procesamiento del agua. Entre estos últimos se encuentran los organoclorados (tetracloruro de carbono y cloroformo, principalmente) que se forman durante la desinfección del agua con cloro (Cisneros, 2001).

**b) Biológicos:** son seres vivos que provocan enfermedades en el hombre u otras especies. Las más comunes en el hombre son la tifoidea, la salmonelosis, disentería, cólera y helmintiasis. Los agentes que las causan entran al agua a través de las heces fecales de humanos o animales. Para tener una idea de la magnitud de este problema, se estima que el 80% de todas las enfermedades, y más del 1/3 de los fallecimientos en países en vías de desarrollo, se debe al consumo de agua contaminada (Cisneros, 2001).

**c) Físicos:** son alteraciones de las propiedades físicas del agua, tales como la temperatura, color, etc. Su origen y efectos son diversos (Cisneros, 2001).

2) De acuerdo con el tamaño, según la medida del contaminante:

- a) **Materia suspendida:** Corresponde a moléculas en fase dispersa con diámetro equivalente entre 1 y 100  $\mu\text{m}$  (micrómetros) (Cisneros, 2001).
- b) **Materia coloidal:** Es materia suspendida con características similares a la materia disuelta. Tiene diámetro equivalente entre  $10^{-3}$  y 1  $\mu\text{m}$  y se caracteriza por ser de sedimentación muy lenta (Cisneros, 2001).
- c) **Materia disuelta:** Son moléculas o iones disueltos con diámetro equivalente entre  $10^{-5}$  y  $10^{-3}$   $\mu\text{m}$  (Cisneros, 2001).

### 2.6.3 Principales contaminantes del agua

Hay un gran número de contaminantes del agua, un ejemplo es la clasificación de (Echarri, 1998).

- a) **Microorganismos patógenos:** Son los diferentes tipos de bacterias, virus, protozoos y otros organismos que transmiten enfermedades como el cólera, tífus, gastroenteritis diversas, hepatitis, etc. Normalmente estos microbios llegan al agua en las heces y otros restos orgánicos que producen las personas infectadas. Por esto, un buen índice para medir la salubridad de las aguas, en lo que se refiere a estos microorganismos, es el número de bacterias coliformes presentes en el agua. La OMS (Organización Mundial de la Salud) recomienda que en el agua para beber haya 0 colonias de coliformes por 100 ml de agua.
- b) **Desechos orgánicos:** Son el conjunto de residuos orgánicos producidos por los seres humanos, ganado, etc. Incluyen heces y otros materiales que pueden ser descompuestos por bacterias aeróbicas, es decir en procesos con consumo de oxígeno. Cuando este tipo de desechos se encuentran en exceso, la proliferación de bacterias agota el oxígeno, y ya no pueden vivir en estas aguas peces y otros seres vivos que necesitan oxígeno. Buenos

índices para medir la contaminación por desechos orgánicos son la cantidad de oxígeno disuelto (OD), en agua, o la DBO (Demanda Biológica de Oxígeno).

- c) *Sustancias químicas inorgánicas:*** En este grupo están incluidos ácidos, sales y metales tóxicos como el mercurio y el plomo. Si están en cantidades altas pueden causar graves daños a los seres vivos, disminuir los rendimientos agrícolas y corroer los equipos que se usan para trabajar con el agua.
- d) *Nutrientes vegetales inorgánicos:*** Nitratos y fosfatos son sustancias solubles en agua que las plantas necesitan para su desarrollo, pero si se encuentran en cantidad excesiva inducen el crecimiento desmesurado de algas y otros organismos provocando la eutrofización de las aguas.
- e) *Compuestos orgánicos:*** Muchas moléculas orgánicas como petróleo, gasolina, plásticos, plaguicidas, disolventes, detergentes, etc. acaban en el agua y permanecen, en algunos casos, largos períodos de tiempo, porque, al ser productos fabricados por el hombre, tienen estructuras moleculares complejas difíciles de degradar por los microorganismos.
- f) *Sedimentos y materiales suspendidos:*** Muchas partículas arrancadas del suelo y arrastradas a las aguas, junto con otros materiales que hay en suspensión en las aguas, son, en términos de masa total, la mayor fuente de contaminación del agua.
- g) *Sustancias radiactivas:*** Isótopos radiactivos solubles pueden estar presentes en el agua y, a veces, se pueden ir acumulando a lo largo de las cadenas tróficas, alcanzando concentraciones considerablemente más altas en algunos tejidos vivos que las que tenían en el agua.
- h) *Contaminación térmica:*** El agua caliente liberada por centrales de energía o procesos industriales eleva, en ocasiones, la temperatura de ríos o

embalses con lo que disminuye su capacidad de contener oxígeno y afecta a la vida de los organismos.

## **2.7 Contaminación en el agua por Cromo Hexavalente**

Normalmente, las concentraciones de Cromo total en el agua de bebida son inferiores a 2 µg/L (2ppb). Sin embargo, el agua de pozos puede tener concentraciones mayores si está contaminada con Cromo (VI) de fuentes industriales o si la zona tiene depósitos importantes de minerales de Cromo. Los efluentes de industrias que utilizan Cromo, como las de cromado, curtido, protección de maderas, textiles, etc; también pueden aportar cantidades relativamente elevadas de Cromo a las aguas superficiales. Cuando no se tratan adecuadamente los desechos sólidos de las industrias que procesan o emplean Cromo, pueden ser fuentes importantes de contaminación para los mantos freáticos, en los que el Cromo puede permanecer por largo tiempo (Albert, 2010).

En teoría, el Cromo (VI) puede persistir en este estado en aguas con bajocontenido de materia orgánica, mientras que, al pH natural de las aguas, el Cromo (III) formará compuestos insolubles, a menos que se formen complejos (Albert, 2010).

En el agua los niveles naturales de Cromo son bajos alcanzando en los ríos concentraciones de Cromo que varían entre 0.1 a 5 µg/L. En el océano, las concentraciones son inferiores a 5 µg/L. Las actividades y efluentes industriales son los principales contaminantes de los cursos de agua llegando a elevar las concentraciones de Cromo por sobre 25 µg/L (Bruhn, et al., 1997).

El nivel máximo de contaminación vigente para Cromo en todas sus formas en el agua potable es de 100 partes por mil millones, esto incluye el Cromo (VI). EPA reevalúa regularmente los estándares para el agua potable y en base a la ciencia nueva, la agencia ha lanzado una revisión rigurosa y exhaustiva de los efectos del Cromo (VI) en la salud humana (EPA, 2011).



## **2.8 Efectos del Cromo Hexavalente**

El Cr (VI) es un compuesto altamente peligroso (Merck, 2006), que puede causar graves efectos en la salud como son el cáncer, de pulmón mayoritariamente, sensibilización de la piel, entre otros no menos importantes (Enciclopedia de Salud, 2006).

### **2.8.1 Efectos del Cromo sobre la salud**

La gente puede estar expuesta al Cromo a través de respirarlo, comerlo o beberlo y a través del contacto con la piel con Cromo o compuestos del Cromo. El nivel de Cromo en el aire y el agua es generalmente bajo. En agua para beber el nivel de Cromo es usualmente bajo como en el agua de pozo, pero el agua de pozo contaminada puede contener el peligroso Cromo (VI). Para la mayoría de la gente que ingiere alimentos que contiene Cromo (III) es la mayor ruta de entrada de Cromo, como el Cromo (III) se encuentra naturalmente en muchos vegetales, frutas, carnes, levaduras y granos. Varias maneras de preparación de la comida y almacenaje pueden alterar el contenido de Cromo en esta. Cuando la comida es almacenada en tanques de acero o latas las concentraciones de Cromo pueden aumentar. El Cromo III es un nutriente esencial para los humanos y la falta de este puede causar condiciones del corazón, trastornos metabólicos y diabetes. Pero la ingesta en exceso de Cromo (III) puede causar efectos sobre la salud también, por ejemplo erupciones cutáneas (Solutions, 2015).

El Cromo (VI) es un peligro para la salud de los humanos, mayoritariamente para la gente que trabaja en la industria del acero y textil. La gente que fuma tabaco también puede tener un alto grado de exposición al Cromo. El Cromo (VI) es conocido porque causa varios efectos sobre la salud. Cuando es un compuesto en los productos de la piel, puede causar reacciones alérgicas, como es erupciones cutáneas. Después de ser respirado el Cromo (VI) puede causar irritación de la nariz y sangrado de la nariz (Solutions, 2015).

Otros problemas de salud que son causados por el Cromo (VI) son:

- Erupciones cutáneas
- Malestar de estómago y úlceras
- Problemas respiratorios
- Debilitamiento del sistema inmune
- Daño en los riñones e hígado
- Alteración del material genético
- Cáncer de pulmón

Todas estas afecciones pueden agravarse si la concentración y la exposición al Cr (VI) es prolongada, lo que podría causar eventualmente la muerte.

### ***2.8.2 Efectos ambientales del Cromo***

Hay varias clases diferentes de Cromo que difieren de sus efectos sobre los organismos. El Cromo entra en el aire, agua y suelo en forma de Cromo (III) y Cromo (VI) a través de procesos naturales y actividades humanas. Las actividades humanas que incrementan las concentraciones de Cromo (III) son el acero, las industrias textiles, pintura eléctrica y otras aplicaciones industriales del Cromo (VI). Estas aplicaciones incrementarán las concentraciones del Cromo en agua. A través de la combustión del carbón el Cromo será también emitido al agua y eventualmente se disolverá (Solutions, 2015).

Los cultivos contienen sistemas para gestionar la toma de Cromo para que esta sea lo suficientemente baja como para no causar cáncer. Pero cuando la cantidad de Cromo en el suelo aumenta, esto puede aumentar las concentraciones en los cultivos. La acidificación del suelo puede también influir en la captación de Cromo por los cultivos. Las plantas usualmente absorben sólo Cromo (III). Esta clase de Cromo probablemente es esencial, pero cuando las concentraciones exceden cierto valor, efectos negativos pueden ocurrir (Solutions, 2015).

No es conocido que el Cromo se acumule en los peces, pero altas concentraciones de Cromo, debido a la disponibilidad de metales en las aguas superficiales, pueden dañar las agallas de los peces que nadan cerca del punto de

vertido. En animales el Cromo puede causar problemas respiratorios, una baja disponibilidad puede dar lugar a contraer las enfermedades, defectos de nacimiento, infertilidad y formación de tumores (Solutions, 2015).

## **2.9 Purificación del agua**

El agua pura es un recurso renovable, sin embargo puede llegar a estar tan contaminada por las actividades humanas, que ya no sea útil, sino nociva, de calidad deficiente. La evaluación de la calidad del agua ha tenido un lento desarrollo. Hasta finales del siglo XIX no se reconoció el agua como origen de numerosas enfermedades infecciosas; sin embargo hoy en día, la importancia tanto de la cantidad como de la calidad del agua está fuera de toda duda (Club Ecológico, 2011).

Hoy en día la importancia sobre la calidad del agua ha permitido evidenciar que existen diferentes factores o agentes los cuales provocan una alteración en su estructura molecular dando como consecuencia la contaminación de este recurso. Algunos de estos factores como ya se había mencionado anteriormente son: agentes patógenos, desechos que requieren oxígeno, sustancias químicas orgánicas e inorgánicas, nutrientes vegetales que ocasionan crecimiento excesivo de plantas acuáticas, sedimentos o material suspendido, sustancias radioactivas y el calor.

Según Stanley (2007), “La purificación del agua para el consumo humano significa la extracción, desactivación o eliminación de los microorganismos patógenos que existen en el recurso. La destrucción y desactivación de los microorganismos supone el final de la reproducción y crecimiento de estos. Si estos microorganismos no son eliminados el agua no es potable y es susceptible de causar enfermedades. Debido a esto, esta investigación va enfocada a obtener agua purificada a partir del agua pluvial, se pretende que el líquido sea apto para el consumo humano”.

La inactivación química de los contaminantes microbiológicos en agua natural o no tratada es normalmente uno de los pasos finales de la purificación para la reducción de microorganismos patógenos en el agua. La combinación de diferentes procesos para la purificación del agua (sedimentación, filtración, desinfección, cloración, por ozono, rayos ultravioleta, etc.) se utiliza para la producción de agua potable y segura para la salud (Annan, 2010).

Para evitar las consecuencias del uso del agua contaminada se han ideado mecanismos de control temprano de la contaminación. Uno de estos mecanismos es la reutilización de este líquido utilizando algún método de purificación (Club Ecológico, 2011).

### **2.9.1 Métodos de Purificación del agua**

El agua purificada se obtiene mediante varios procesos de purificación, contrario a lo que se puede pensar, ya que antes el agua solo se "filtraba" y estaba lista para tomar, hoy en día no solo se debe filtrar, pues la filtración es solo eliminar partículas suspendidas en el agua como tierra, estos contaminantes son los más inofensivos, por lo que actualmente se deben eliminar mucho más contaminantes del agua (Annan, 2010).

Según Anaya (2011) algunos métodos de tratamiento para obtener agua potable y purificada son:

#### **a) Cloración**

Antes de iniciar el proceso, el agua es almacenada en tanques plásticos de 5000 litros y es clorada con hipoclorito de sodio al 13% o dióxido de cloro estabilizado al 8%. El cloro elimina la mayor parte de las bacterias, hongos, virus, esporas y algas presentes en el agua.

Una concentración de 3-5 ppm es suficiente para destruir bacterias e inactivar virus después de un tiempo de reacción mínimo de 30 minutos (Anaya, 2011).

### ***b) Proceso de filtración***

El filtro Speedy o filtro tamiz de 100 $\mu$  (micras) tiene como funciones y ventajas: (Anaya, 2011).

- Filtración real de sólidos, sedimentos, tierra, lodo y arcilla.
- Su tamaño es de 25 cm x 10 cm.
- No tiene gastos de mantenimiento
- El suministro de agua es ininterrumpido.
- Canal de aspiración patentado con escobillas de limpieza.
- Sin cambio de cartucho.
- No desperdicia agua en los retro lavados.

### ***c) Filtro de carbón activado (GAC)***

El agua pasa a columnas con carbón activado debidamente seleccionado y considerando las características fisicoquímicas del agua, obteniendo eficiencia en la adsorción del cloro residual, eliminación de sabores y olores característicos, como productos químicos dañinos, tales como: pesticidas, herbicidas, metilato de mercurio e hidrocarburos clorados (Anaya, 2011).

Este compuesto GAC (Granular Activated Carbón) es pasado por un pre-tratamiento con diferentes elementos bactericidas para generar un ambiente hostil para la mayoría de las bacterias más comunes, dándole con ello propiedades autoesterilizables (Anaya, 2011).

### ***d) Microfiltros pulidores***

La función de estos filtros es detener paulatinamente las impurezas pequeñas haciendo pasar el agua por un primer pulidor de 20 micras, después por uno de 10 micras y hasta 5 micras en el último cartucho. Los pulidores son fabricados en polipropileno grado alimenticio (FDA). Después de este paso, se obtiene agua potable de excelente calidad (Anaya, 2011).

### **e) Suavización**

El agua se considera dura cuando contiene minerales disueltos en forma de iones de calcio, magnesio y hierro. La remoción de estos minerales se logra por medio de la suavización del agua a través de un proceso de intercambio iónico. Al paso del agua a través del tanque de resina, los minerales disueltos son atrapados por la misma. El uso del suavizador disminuye las sales disueltas antes de pasar al equipo de ósmosis inversa, lo cual aumenta la vida de las membranas del equipo (Anaya, 2011).

### **f) Ósmosis inversa**

Es la separación de componentes orgánicos e inorgánicos presentes en el agua, la separación de estos componentes se realiza principalmente por el uso de presión ejercida en una membrana semipermeable que es mayor que la presión osmótica de la solución. La presión fuerza el paso del agua a través de la membrana semipermeable, dejando atrás los sólidos disueltos. El resultado es un flujo de agua pura, libre de minerales, coloides, levaduras, microbios, proteínas y aromáticos (Anaya, 2011).

La ósmosis normal toma lugar cuando el agua pasa de una solución menos concentrada a una más concentrada a través de una membrana semipermeable. La membrana de ósmosis inversa es una película de acetato de celulosa (Anaya, 2011).

### **g) Luz ultravioleta**

La radiación ultravioleta funciona como un germicida, ya que esta deroga la vida de las bacterias, gérmenes, algas, virus y esporas presentes en el agua; a través de la luz ultravioleta.

Una de las ventajas de esta técnica es que no permite la proliferación de los microorganismos ya que destruye su ADN y estos mueren al contacto con la luz, obteniendo como resultado final un líquido libre de gérmenes vivos (Anaya, 2011).

### ***h) Ozonificación***

Esta técnica, como su nombre lo indica utiliza el componente ozono; este se encarga de eliminar a los microorganismos en unos cuantos segundos por un proceso denominado destrucción de celda. La ruptura molecular de la membrana celular provocada dispersa el citoplasma celular en el agua y lo destruye. El componente ozono actúa sobre el agua potable eliminando por proceso de oxidación todos los elementos perjudiciales para la salud humana, algunos de estos elementos son: virus, bacterias, y hongos, además de oxidar los metales, los cuales pueden ser filtrados y eliminados del agua (Anaya, 2011).

A continuación se presentan métodos de purificación considerados por la PROFECO (Procuraduría Federal del Consumidor):

#### ***a) Desinfección por ebullición***

Para eliminar las bacterias se debe hervir el agua de 15-30 minutos (PROFECO, 2012).

#### ***b) Desinfección con cloro***

La cantidad de ésta sustancia que debe agregarse al agua depende de la concentración que tenga el compuesto de cloro que se venda en la región. Usualmente tres gotas por litro suele ser suficiente. Después de agregar el cloro se debe esperar media hora antes de tomar el agua. Este método puede cambiar el sabor del agua (PROFECO, 2012).

#### ***c) Desinfección con plata iónica***

Existen productos en el mercado para desinfectar agua y alimentos que utilizan compuestos de plata iónica o coloidal con efecto germicida. Los fabricantes recomiendan esperar cierta cantidad de tiempo después de añadirlos al agua, pero es preferible esperar el doble del tiempo sugerido (PROFECO, 2012).

#### **d) Filtros de cerámica**

Estos filtros separan materia sólida del líquido gracias a sus poros finos. Es importante que liberen o estén impregnados con plata iónica ya que sobre los filtros se pueden desarrollar microorganismos. Los filtros están formados por una barra de cerámica cubierta por un cilindro metálico que se adapta a la llave del agua (PROFECO, 2012).

#### **e) Filtro de carbón activado**

El agua pasa por un filtro de carbón activado, el cual contiene millones de agujeros microscópicos que capturan y rompen las moléculas de los contaminantes. Éste método elimina cloro, mal olor, sabores desagradables y sólidos pesados; asimismo retiene algunos contaminantes orgánicos como insecticidas, pesticidas y herbicidas. Estos filtros deben contar con un sistema de desinfección colocado después del filtro (como luz ultravioleta o plata iónica) (PROFECO, 2012).

#### **f) Purificación por ozono**

El ozono descompone los organismos vivos sin dejar residuos químicos que puedan dañar la salud o alterar el sabor del agua. Reduce el aspecto turbio, el mal olor y sabor del agua, la cantidad de sólidos en suspensión; elimina bacterias; inactiva virus y otros microorganismos que el cloro no puede destruir (PROFECO, 2012).

#### **g) Desinfección por rayos ultravioleta (UV)**

El agua pasa por un filtro que retiene las partículas en suspensión, después pasa por un filtro de carbón activado (eliminando mal olor, sabor, color y cloro), y finalmente se purifica por medio de luz UV que destruye bacterias (PROFECO, 2012).



### ***h) Purificación por ósmosis inversa***

Se utiliza una membrana semipermeable que separa y elimina del agua sólidos, sustancias orgánicas, virus y bacterias disueltas en el agua. Puede eliminar alrededor de 95% de los sólidos disueltos totales y 99% de bacterias (PROFECO, 2012).

A continuación se resumen estos métodos de purificación en la tabla 2.1 colocando sus ventajas y desventajas.

Tabla 2.1. Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de purificación del agua.

| <b>Método de purificación</b>   | <b>Ventajas</b>   | <b>Desventajas</b>  |
|---------------------------------|---|---|
| Cloración                       | <ul style="list-style-type: none"><li>-Es uno de los métodos rápidos, económicos y eficaces para eliminar las bacterias contenidas en el agua.</li><li>-Puede utilizarse a escala individual, familiar o colectiva.</li></ul>   | <ul style="list-style-type: none"><li>-Al agregarle exceso de cloro existe un sabor muy desagradable.</li><li>-La fiabilidad de estos tratamientos es buena, pero puede fallar.</li><li>-Tratar cantidades grandes de agua resulta difícil.</li><li>-La cloración del agua puede crear subproductos (compuestos organoclorados) considerados nocivos desde el punto de vista sanitario.</li></ul> |
| Proceso de filtración           | <ul style="list-style-type: none"><li>-Muy útil, e incluso indispensable para el tratamiento previo.</li><li>- Sencillez de aplicación.</li><li>-Reducción importante de las impurezas y los gérmenes patógenos.</li></ul>  | <ul style="list-style-type: none"><li>-Tratamiento somero incapaz de proporcionar agua potable si el agua está contaminada en origen.</li><li>-La desinfección no es total.</li></ul>   |
| Filtro de carbón activado (GAC) | <ul style="list-style-type: none"><li>-Este método es muy eficiente para eliminar el cloro, el mal olor, los sabores desagradables y los sólidos pesados en el agua.</li><li>-Retiene algunos contaminantes orgánicos, como insecticidas, pesticidas y herbicidas.</li><li>-Puede durar hasta 6 años.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>-Pueden saturarse y contaminarse con microorganismos (deben cambiarse cada cinco meses), y si no se cuenta con un sistema de desinfección colocado después del filtro (como luz UV, plata iónica, etcétera) el agua ya no es segura para beber.</li></ul>   |

|                             |   |  |
|-----------------------------|---|--|
| Microfiltros pulidores      | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Retiene las impurezas pequeñas (sólidos hasta 5 micras).</li> <li>-Generación de agua cristalina.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Cambio del cartucho filtrante se debe hacer cada 4 o 6 meses.</li> </ul>   |
| Suavización                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Retiene el calcio, sodio y magnesio, por lo que elimina la dureza del agua.</li> <li>-Se evita la incrustación y obstrucción de las tuberías, ahorrándose costosas reparaciones.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>-El equipo se calcula en base al contenido de dureza y el consumo de agua requerido.</li> </ul>   |
| Ósmosis inversa             | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Utiliza una membrana semipermeable que separa y elimina del agua sólidos, sustancias orgánicas, virus y bacterias disueltas en el agua.</li> <li>-Puede eliminar alrededor de 95% de los sólidos disueltos totales (SDT) y 99% de todas las bacterias.</li> <li>-Durante la operación, la misma agua limpia la membrana, lo que disminuye los gastos.</li> <li>-No produce ni utiliza productos químicos nocivos durante el proceso.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Un equipo de filtración por ósmosis inversa tiene un precio aproximado de \$3,000 a \$4,500.</li> <li>-Este método devuelve tan solo entre el 5 y el 15 % del agua empujada a través del mismo, lo que significa que también tarda mucho tiempo para tratarla apropiadamente.</li> </ul>   |
| Luz ultravioleta            | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Este método es automático, efectivo, no daña al medio ambiente y es fácil de instalar.</li> <li>-Puede purificar hasta 200 litros de agua al día.</li> <li>-Puede durar hasta 6 años.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>-El precio de un equipo purificador de rayos UV va de \$3,700 a \$5,200.</li> <li>-Los filtros se deben reemplazar cada seis meses y el bulbo de la lámpara de rayos UV debe cambiarse cada año.</li> </ul>   |
| Ozonificación               | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Descompone los organismos vivos sin dejar residuos químicos que puedan dañar la salud o alterar el sabor del agua.</li> <li>-Reduce de manera importante el aspecto turbio, el mal olor y sabor del agua.</li> <li>-Elimina sólidos en suspensión.</li> <li>-No sólo elimina las bacterias causantes de enfermedades, sino que también inactiva virus y otros microorganismos que el cloro no puede destruir.</li> </ul>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Su principal desventaja es su elevado costo (de \$6,500 a \$14,000).</li> <li>-Requiere mantenimiento constante, instalación especial y utiliza energía eléctrica.</li> <li>-Puede formar otros subproductos perjudiciales, entre los que destacan los bromatos y aldehídos.</li> <li>-Puede formar óxido nítrico ó ácido nítrico, que causaran corrosiones en los equipos.</li> </ul> |
| Desinfección por ebullición | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Es una forma sencilla y económica de desinfección al alcance de la mayoría de los hogares.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Concentración del contenido de minerales disueltos, debido a la vaporización del agua.</li> </ul>  |

|                               |   |  |
|-------------------------------|---|--|
| Desinfección con plata iónica | <ul style="list-style-type: none"> <li>-En el mercado existen algunos productos para desinfectar agua y verduras que utilizan compuestos de plata iónica.</li> <li>-Las aparentes virtudes de la plata para el tratamiento del agua son que no produce sabor, olor ni color en el agua tratada y no hay formación de productos adicionales.</li> <li>-Es una metodología muy simple y fácil de manejar en las áreas rurales.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-No destruye a todos los microorganismos patógenos.</li> <li>-Resulta difícil controlar la dosificación por falta de un método simple de análisis de laboratorio.</li> <li>-Costos de operación muy altos.</li> </ul>   |
| Filtros de cerámica           | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Estos filtros separan materia sólida del líquido gracias a que tienen un poro muy fino (es decir, retienen partículas muy pequeñas).</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Sobre estos filtros se pueden desarrollar colonias de microorganismos.</li> <li>-Tiene que estar complementario con plata iónica.</li> <li>-El precio aproximado de un filtro de cerámica con plata iónica es de alrededor de \$2,200, y proporciona unos 60 litros diarios (el flujo de agua es muy bajo).</li> </ul> |

Fuente: Elaboración propia, con base a la información del documento Métodos para purificar el agua, (Huerta, 2011).

De manera más puntual hablaremos de los sistemas de biofiltración como método de purificación de agua, ya que estos son de nuestro interés dentro de esta investigación.

## 2.10 Biofiltros

### 2.10.1 Definición de Biofiltro

El biofiltro es un sistema que imita a los humedales (pantanos) naturales, donde las aguas residuales se depuran por procesos naturales. Son humedales artificiales de flujo subterráneo, diseñados para maximizar la remoción de los contaminantes que se encuentran en las aguas residuales. Los biofiltros son pilas de poca profundidad rellenas con un material que sirve como lecho filtrante, en cuya superficie se siembran plantas de pantano, y en las que las aguas residuales pretratadas fluyen en sentido horizontal o vertical. (Vera, 2006).

Esta tecnología se comenzó a investigar a nivel experimental en Alemania en la década de 1960, aunque no fue hasta en las dos últimas décadas del siglo pasado que comenzaron a utilizarse para el tratamiento de aguas residuales generadas por pequeños núcleos poblacionales en países de todos los continentes del mundo. (Brikké, 2006).

Las primeras aplicaciones de la biofiltración se centraron en el control de olores provenientes del tratamiento de aguas residuales y del compostaje. De hecho, como ha sido puesto en evidencia por Pomeroy (1982), tanto el ser humano como ciertos animales han utilizado el suelo para enterrar sustancias que emanaban malos olores. Así pues, los primeros biofiltros utilizaron la capacidad del suelo para reducir en nivel de sustancias orgánicas volátiles, partículas sólidas y malos olores. (Valderrama, 1998).

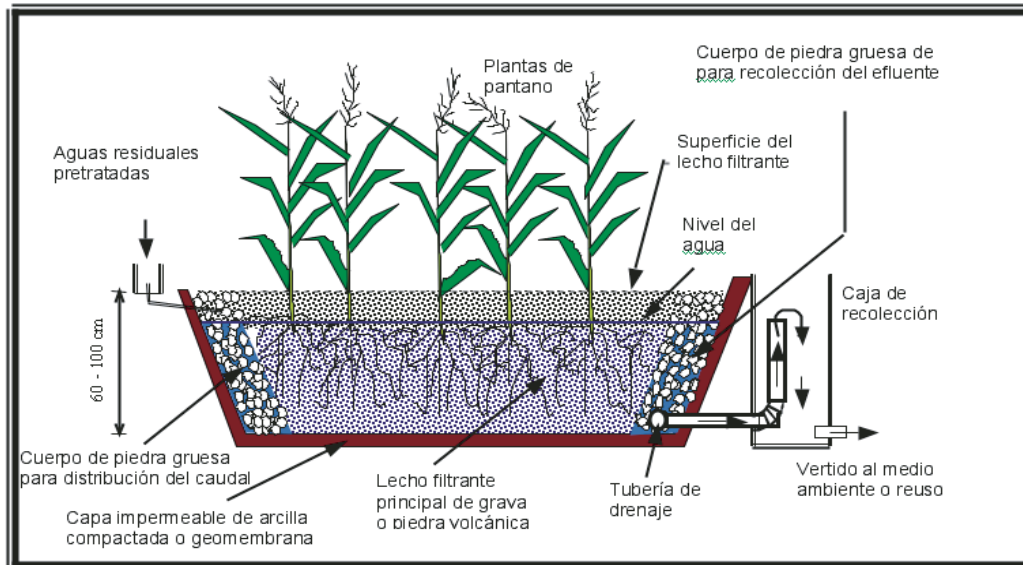
El biofiltro de Pomeroy es citado, como el primer biofiltro que apareció en Estados Unidos. Se trata de un biofiltro a cielo abierto (utilizando únicamente la capa superficial del suelo, que está bien aireada) que funcionaba desde 1953 en California y tenía como objetivo la eliminación de malos olores producidos por aguas residuales (Leson y Winer, 1991).

En Europa, las primeras aplicaciones de los biofiltros a cielo abierto consistieron en reducir o eliminar los malos olores provenientes del tratamiento de aguas residuales en Nuremberg (Alemania) en 1958 y del compostaje en Génève-Vilette (Suiza) en 1963. Tanto Alemania como Holanda son los países líderes en trabajos de biofiltración.

### **2.10.2 Descripción del biofiltro de flujo horizontal**

Un biofiltro de flujo horizontal consta de pilas rectangulares con profundidades que oscilan entre 60 y 100 cm, con un relleno de material grueso (5 a 10 cm de diámetro) en las zonas de distribución (entrada) y recolección (salida). La fracción principal del lecho filtrante, ubicada entre las zonas de material grueso, es

homogénea y más fina, normalmente de 0.5 a 15 mm de diámetro, tal como se muestra en la Figura 2.1.



**Figura 2.1 Sección longitudinal de un Biofiltro de flujo horizontal**

Fuente: Biofiltro una opción sostenible para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades, en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd32/biofil.pdf> (2006)

En este tipo de biofiltro, las aguas residuales pretratadas fluyen lentamente desde la zona de distribución en la entrada de la pila, con una trayectoria horizontal a través del lecho filtrante, hasta llegar a la zona de recolección del efluente. (WSP, 2006).

Durante este recorrido, que dura de tres a cinco días, el agua residual entra en contacto con zonas aeróbicas (con presencia de oxígeno) y anaeróbicas (sin presencia de oxígeno), ubicadas las primeras alrededor de las raíces de las plantas, y las segundas en las áreas lejanas a las raíces.

Durante su paso a través de las diferentes zonas del lecho filtrante, el agua residual es depurada por la acción de microorganismos que se adhieren a la superficie del lecho y por otros procesos físicos tales como la filtración y la sedimentación.

### **2.10.3 Etapas de un sistema de biofiltro**

Un sistema de tratamiento de biofiltro abarca las siguientes etapas:

#### **a) Pretratamiento**

Conformado por una rejilla de retención de sólidos gruesos y un desarenador de limpieza manual, el cual podría también cumplir la función de trampa de grasa mediante la instalación de un baffle al final de la unidad. Normalmente se construyen dos desarenadores en paralelo para permitir el mantenimiento (WSP, 2006).

#### **b) Tratamiento primario**

Tiene el propósito de retener la mayor fracción de los sólidos suspendidos, mediante un tanque de sedimentación que puede ser un tanque séptico de tres cámaras o un tanque Imhoff. Cuando estos tanques se cierran, puede instalarse un filtro de biogás para eliminar los olores desagradables (WSP, 2006).

#### **c) Tratamiento secundario**

Está conformado por un biofiltro de flujo horizontal, cuyo propósito es remover los contaminantes aún presentes en las aguas residuales (WSP, 2006).

#### **d) Pila de secado de lodos**

Los lodos generados en las diferentes etapas del sistema (desarenador, tanque Imhoff) son recolectados y trasladados a esta pila, donde permanecen al menos cuatro meses para permitir su estabilización (WSP, 2006).

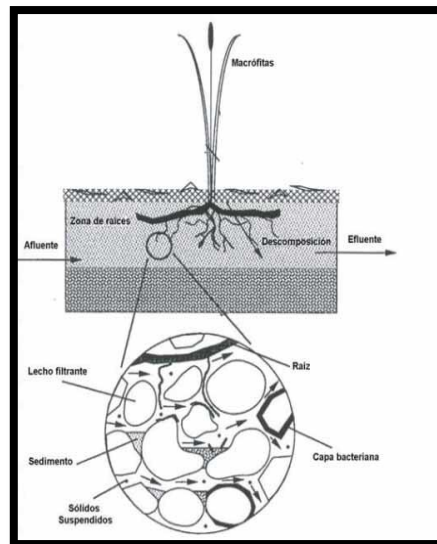
## 2.10.4 Principales componentes de un biofiltro

### a) Lecho filtrante

Las funciones principales del lecho filtrante son eliminar los sólidos que contienen las aguas pretratadas y proporcionar la superficie donde se desarrollarán los microorganismos que se encargarán de degradar aeróbica y anaeróbicamente la materia contaminante.

Los criterios para seleccionar el lecho filtrante son la granulometría, la porosidad, la permeabilidad y la resistencia física contra el desgaste provocado por las aguas residuales. Es indispensable que se realice una evaluación cuidadosa a cargo de especialistas para garantizar el buen funcionamiento de un biofiltro. Los materiales utilizados son grava, piedra triturada o piedra volcánica (WSP, 2006).

En la Figura 2.2 se presentan los procesos que se llevan a cabo dentro del lecho filtrante durante el paso de las aguas residuales en un biofiltro de flujo horizontal.



**Figura 2.2 Lecho Filtrante**

Fuente: Biofiltro una opción sostenible para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades, en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd32/biofil.pdf> (2006).

### ***b) Plantas de pantano***

Las funciones que cumplen las plantas en los procesos de tratamiento de aguas residuales las convierten en componente esencial del biofiltro. Así, las raíces de las plantas ayudan a incrementar los efectos físicos tales como la filtración y el desarrollo de los microorganismos en su área superficial. La introducción de oxígeno en el lecho filtrante permite la formación de una población microbiana aeróbica en zonas cercanas a las raíces de las plantas. (WSP, 2006).

La planta más utilizada a nivel mundial es la *Phragmites australis*, conocida comúnmente en la región como carrizo, por su capacidad de proveer de oxígeno al lecho filtrante. Otras plantas utilizadas son la *Pennisetum purpureum* (zacate Taiwán), que puede ser utilizada como alimento animal; y las de la familia de las Heliconias (platanillo), porque proporcionan un aspecto colorido y estético. En general, es recomendable que las plantas de pantano crezcan en la zona de construcción del biofiltro.

### ***c) Microorganismos:***

El papel principal de los microorganismos es degradar aeróbicamente (en presencia de oxígeno) y anaeróbicamente (en ausencia de oxígeno) la materia orgánica contaminante contenida en las aguas residuales, con lo cual la putrescibilidad en el biofiltro se reduce significativamente.

Los microorganismos también permiten la remoción de nitrógeno mediante el mecanismo de nitrificación–desnitrificación. (WSP, 2006).

### ***2.10.5 Recomendaciones para la operación y mantenimiento de los biofiltros***

La operación y mantenimiento de los Biofiltros parecen ser complejos, sin embargo la operación se vuelve relativamente simple luego de que entran a funcionar completamente. En la fase de puesta en marcha, el personal asignado a la operación y mantenimiento deberá ser entrenado para la aplicación del biofiltro.



Algunas consideraciones claves se presentan a continuación:

- 1) Los posibles operadores deberían ser parte de las fases constructivas, de tal manera que ellos puedan familiarizarse con todos los componentes del sistema (Carrión, 2008).
- 2) Se necesita dar atención diaria a los lechos para estar seguros de que ellos están saturados pero no inundados (Carrión, 2008).
- 3) El tanque séptico debe ser diariamente inspeccionados para asegurar que los sólidos no están pasando a los humedales, así mismo se debe retirar las espumas y grasas que flotan en el tanque (Carrión, 2008).
- 4) Verificar constantemente el crecimiento saludable de las plantas, malos olores, agua sobre la superficie, inundaciones, limpieza, buen mantenimiento, seguridad, etc. (Carrión, 2008).
- 5) Es necesario la toma de muestras por lo menos dos veces durante el primer año en el ingreso del sistema de tratamiento y el efluente final. En el segundo año, se puede evaluar una vez, a fin de monitorear la remoción de coliformes fecales (Carrión, 2008).

### **2.11 Tipos de biofiltros**

Los equipos empleados para la purificación biológica de gases y aguas residuales pueden subdividirse en tres tipos: biofiltro de lecho fijo (BLF), biofiltro de lecho escurrido (BLE) y biolavadores. Esta clasificación se basa en las condiciones en las que se encuentran los microorganismos en el sistema y del patrón de flujo de la fase líquida, tal y como se muestra en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2 Clasificación de los biofiltros en función de la fase líquida y biológica**

|                |              | Fase Líquida                 |                         |
|----------------|--------------|------------------------------|-------------------------|
|                |              | En movimiento                | Estacionaria            |
| Fase Biológica | Dispersa     | Biolavador                   |                         |
|                | Inmovilizada | Biofiltro de lecho escurrido | Biofiltro de lecho fijo |

Fuente: Instituto Nacional de Ecología (2012)

Las características de cada uno de estos dispositivos aparecen a continuación.

### **2.11.1 Biofiltro de lecho fijo**

Los biofiltros de lecho fijo (BLF) constan de un lecho empacado que se conoce como material filtrante y que puede ser sintético u orgánico, que sirve como soporte para los microorganismos y en el caso de los orgánicos como fuente de nutrientes para el crecimiento microbiano. Ejemplos de materiales filtrantes utilizados en este tipo de filtros son rocas porosas, tierra de diatomeas, perlita, tierra, trozos de maderas, diferentes tipos de compostas, residuos orgánicos tales como cáscaras de cacahuate, de arroz o de coco, fibra de caña de azúcar, entre otros (INE, 2012).

### **2.11.2 Biofiltro de lecho escurrido**

El biofiltro de lecho escurrido (BLE) consiste de una columna empacada con un soporte inerte (usualmente de material cerámico o plástico) donde se desarrolla la biopelícula. A través del lecho se alimenta una corriente gaseosa que contiene al sustrato por biodegradar y una corriente líquida que es comúnmente reciclada a través del lecho y que tiene la función de aportar nutrientes esenciales a la biopelícula, así como de remover los productos de degradación de los microorganismos. Estos sistemas se recomiendan para compuestos solubles en agua (INE, 2012).

Los biofiltros de lecho escurrido tienen similares ventajas que los biolavadores, ya que la recirculación del líquido facilita la eliminación de los productos de reacción

así como un mayor control sobre el proceso biológico a través del control del pH y la composición del medio líquido. La operación de absorción y biodegradación del contaminante en los biofiltros de lecho escurrido se lleva a cabo en un solo reactor, lo cual los pone en ventaja sobre los biolavadores respecto a la huella física y la operación del mismo (INE, 2012).

### **2.11.3 Biolavador**

A diferencia de los biofiltros, en los biolavadores el compuesto a degradar primero es absorbido en la fase líquida localizada en una torre de absorción llena de líquido. La operación consiste en hacer fluir el gas a contracorriente a través del líquido, donde los contaminantes y el O<sub>2</sub> son absorbidos. Posteriormente el líquido es alimentado a un reactor empacado de un material inerte cubierto de la película biológica encargada de degradar al contaminante. Los biolavadores son los sistemas más adecuados para el tratamiento de compuestos muy solubles en agua (INE, 2012).

Las principales ventajas de los biolavadores son: a) La recirculación del líquido que favorece la no acumulación de productos que pudieran tener efectos nocivos para los microorganismos y b) la facilidad de control del proceso biológico a través de la composición del medio líquido. Sin embargo, el requerimiento de dos equipos, uno para la absorción y otro para la biodegradación del contaminante, los hace poco convenientes con respecto a los biofiltros de lecho escurrido (INE, 2012).

En la tabla 2.3 se muestran las ventajas y desventajas de los tres tipos de biofiltros ya mencionados anteriormente.

**Tabla 2.3 Ventajas y desventajas de los sistemas de biofiltración**

| <b>Tipo de biofiltro</b> | <b>Ventajas</b>  | <b>Desventajas</b>   |
|--------------------------|--|--|
| Biofiltro de Lecho Fijo  | -Altas superficies de contacto gas-líquido<br>-Fácil arranque y operación.<br>-Bajos costos de inversión.<br>-Soporta periodos sin | -Poco control sobre fenómenos de reacción.<br>-Baja adaptación a altas fluctuaciones de flujo de gas.<br>-Grandes volúmenes de reactor |

|                             |   |  |
|-----------------------------|---|--|
|                             | <p>alimentación.<br/>         -Conveniente para operación intermitente.<br/>         -No produce agua de desecho.</p>   | <p>-No conveniente para tratamiento de contaminantes cuyos subproductos son compuestos ácidos.</p>   |
| Biolavador                  | <p>-Mejor control de la reacción.<br/>         -Posibilidad de evitar acumulación de subproductos.<br/>         -Equipos compactos.<br/>         -Baja caída de presión.</p>  | <p>-Baja superficie de contacto gas-líquido.<br/>         -No soporta periodos sin alimentación<br/>         -Genera lodo residual.<br/>         -Arranque completo.<br/>         -Necesidad de aireación extra.<br/>         -Altos costos de inversión, operación y mantenimiento.<br/>         -Necesidad de suministrar nutrientes.</p>  |
| Biofiltro de Lecho Ecurrido | <p>-Control de concentración de sustratos.<br/>         -Posibilidad de evitar acumulación de subproductos.<br/>         -Equipos compactos.<br/>         -Baja caída de presión.<br/>         -Alta transferencia de oxígeno y del contaminante.</p> | <p>-Baja superficie de contacto gas-líquido.<br/>         -Generación de lodos.<br/>         -No resiste periodos sin alimentación.<br/>         -Necesidad de suministrar nutrientes<br/>         -Arranque complejo.<br/>         -Altos costos de inversión, operación y mantenimiento.<br/>         -Taponamiento por biomasa.<br/>         -Producción de agua de desecho.<br/>         -No conveniente para tratamiento de contaminantes cuyos subproductos son compuestos ácidos.</p> |

Fuente: Instituto Nacional de Ecología (2012)

## 2.12 Ventajas de los sistemas de filtración biológica

### 2.12.1 Beneficios económicos

- El costo de construcción es bajo
- El costo de instalación y operación son bajos
- No se requiere de un consumo energético

### 2.12.2 Medioambientales

- Hasta 80% de ahorro energético
- No genera malos olores
- No genera desechos contaminantes
- No requiere de productos químicos
- No existe la generación de lodos

- Permite contar con más agua para el Medio Ambiente
- Se obtiene un subproducto llamado humus de lombriz, el cual puede ser utilizado como abono orgánico. Su uso en la explotación agrícola permite conseguir altos ahorros en fertilizantes químicos, contribuyendo a la calidad del suelo.

### **2.12.3 Sociales:**

- Da trabajo a la comunidad donde se instala
- Mejora la calidad de vida de la población al tratar sus aguas contaminadas
- Permite que la población viva en ambientes más limpios
- Posibilidad de que los comuneros comercialicen los fertilizantes y fuentes proteicas
- El Sistema permite reutilizar el agua tratada, teniendo un valor adicional en lugares con escasez de agua.

### **2.13 Desventajas del biofiltro**

En el apartado anterior se mencionaron los beneficios económicos, sociales y ambientales que ofrecen los biofiltros, pero como en cualquier otra tecnología no todo siempre es bueno por lo tanto a continuación se mencionarán algunas de las desventajas de este sistema.

- No resiste periodos sin alimentación- Necesidad de suministrar nutrientes.
- No es recomendable para tratar grandes volúmenes de efluente.
- No puede remover fácilmente compuestos disueltos en el agua (sales, dureza, arsénico y fluoruro, entre otros).
- No puede remover los químicos (pesticidas y fertilizantes, entre otros).
- No remueve todo el color del agua.
- El agua con mucha turbiedad tapa el filtro, por lo que se requiere dejar sedimentar el líquido antes de verterlo.
- Acumulación de lodos.

# **Capítulo 3: Marco Normativo**

La calidad del agua es un factor determinante de la salud pública y de los ecosistemas, que restringe la oferta de agua y su distribución potencial para los diferentes usos. El agua está asociada a la transmisión de enfermedades que afectan la salud humana, ya sea por ingestión directa o mediante la contaminación de alimentos, por lo que su calidad está absolutamente relacionada con la calidad de vida de la población (WWDR, 2003).

Es por esta razón que es importante que exista una evaluación y un monitoreo continuo sobre la calidad que presenta el agua que es distribuida a los hogares de nuestro país, para evitar un desequilibrio de la salud humana.

Para ello existen diferentes normatividades las cuales se encargan de establecer las características que debería de tener el agua de buena calidad. Así como también algunos parámetros de contaminación de este líquido.

Las leyes que determinan la normativa respecto a la calidad del agua son cuatro:

- 1) La Ley de Aguas Nacionales, LAN (DOF, 29 de Abril de 2004), en la que la calidad del recurso resulta un tema interesante en relación con los efectos potenciales en la salud y el ambiente.
- 2) La Ley Federal de Derechos, que en materia de agua utiliza los lineamientos de calidad de Estados Unidos del año de 1989.
- 3) La Ley General del Equilibrio Ecológico y la protección al Ambiente (LGEEPA), que trata, entre otros temas, la prevención y el control de la contaminación del agua y los ecosistemas acuáticos.
- 4) La Ley General de Salud, que determina los valores permisibles para el agua de consumo humano y ciertos requisitos sanitarios.

Otros elementos jurídicos de regulación de la calidad son algunas normas oficiales mexicanas (NOM) que definen las características físicas, biológicas y químicas en

las que se deberían de basar los análisis del agua para considerar si cumple o no con las condiciones deseables para determinados usos.

En los siguientes apartados, se mencionaran más a detalle las normas y políticas con respecto al cuidado, uso y contaminación del agua, desde el ámbito federal, estatal y municipal.

### **3.1 Políticas Públicas sobre el agua**

En este apartado se darán a conocer las diferentes políticas que existen a nivel federal, estatal y municipal que corresponden con la temática del tratamiento y cuidado del agua.

#### **3.1.1 Nivel Federal**

##### **a) Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2013-2018**

###### ***Desarrollo Sustentable***

Hoy, existe un reconocimiento por parte de la sociedad acerca de que la conservación del capital natural y sus bienes y servicios ambientales, son elemento clave para el desarrollo de los países y el bienestar de la población.

En este sentido, México ha demostrada un gran compromiso con la agenda internacional de medio ambiente y desarrollo sustentable, y participa en más de 90 acuerdos y protocolos vigentes, siendo líder en temas como cambio climático y biodiversidad. No obstante, el crecimiento económico del país sigue estrechamente vinculado a la emisión de compuestos de efecto invernadero, generación excesiva de residuos sólidos, contaminantes en la atmósfera, aguas residuales no tratadas y pérdida de bosques y selvas.

Ello implica retos importantes para propiciar el crecimiento y desarrollo económicos, a la vez asegurar que los recursos naturales continúen proporcionándolos servicios ambientales de los cuales depende nuestro bienestar:



- a) El 12% de la superficie nacional esta designada como área protegida.
- b) Cerca de 60 millones de personas viven en localidades que se abastecen en alguno de los 102 acuíferos sobreexplotados del país.
- c) Se debe incrementar el tratamiento del agua residual colectada en México más allá del 47.5% actual

La sustentabilidad incluye el manejo responsable de los recursos hídricos, el aumento de la cobertura de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento, así como la infraestructura hidroagrícola y de contral de inundaciones.

### ***México Próspero***

**Objetivo 4.4** Impulsar y orientar un crecimiento verde incluyente y facilitador que preserve nuestro patrimonio natural al mismo tiempo que genere riqueza competitividad y empleo.

**Estrategia 4.4.2.** Implementar un manejo sustentable del agua, haciendo posible que todos los mexicanos tengan acceso a este recurso.

#### **Lineas de acción**

- Asegurar agua suficiente y de calidad adecuada para garantizar el consumo humano y la seguridad alimentaria.
- Ordenar el uso y aprovechamiento del agua en cuencas y acuíferos afectados por déficit y sobreexplotación, propiciando la sustentabilidad sin limitar el desarrollo.
- Incrementar la cobertura y mejorar la calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento.
- Sanear las aguas residuales con un enfoque integral de cuenca que incorpore a los ecosistemas costeros y marinos.
- Fortalecer el desarrollo y la capacidad técnica y financiera de los organismos operadores para la prestación de mejores servicios.

- Fortalecer el marco jurídico para el sector de agua potable, alcantarillado y saneamiento.
- Reducir los riesgos de fenómenos meteorológicos e hidrometeorológicos por inundaciones y atender sus efectos.
- Rehabilitar y ampliar la infraestructura hidroagrícola.

**Estrategia 4.10.4** Impulsar el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales del país.

#### **Lineas de acción**

- Promover la tecnificación del riego y optimizar el uso del agua.

#### ***b) Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)***

#### **Título Primero: Disposiciones Generales**

#### **Capítulo III: Política Ambiental**

**Artículo 15:** Para la formulación y conducción de la política ambiental y la expedición de normas oficiales mexicanas y demás instrumentos previstos en esta Ley, en materia de preservación y restauración del equilibrio ecológico y protección al ambiente, el Ejecutivo Federal observará los siguientes principios:

**VII.-** El aprovechamiento de los recursos naturales renovables debe realizarse de manera que se asegure el mantenimiento de su diversidad y renovabilidad.

#### **Título Tercero: Aprovechamiento Sustentable de los Elementos Naturales**

#### **CAPÍTULO I: Aprovechamiento Sustentable del Agua y los Ecosistemas Acuáticos**

**Artículo 88.-** Para el aprovechamiento sustentable del agua y los ecosistemas acuáticos se considerarán los siguientes criterios:

I. Corresponde al Estado y a la sociedad la protección de los ecosistemas acuáticos y del equilibrio de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico;

II.- El aprovechamiento sustentable de los recursos naturales que comprenden los ecosistemas acuáticos debe realizarse de manera que no se afecte su equilibrio ecológico;

III.- Para mantener la integridad y el equilibrio de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico, se deberá considerar la protección de suelos y áreas boscosas y selváticas y el mantenimiento de caudales básicos de las corrientes de agua, y la capacidad de recarga de los acuíferos, y

IV.- La preservación y el aprovechamiento sustentable del agua, así como de los ecosistemas acuáticos es responsabilidad de sus usuarios, así como de quienes realicen obras o actividades que afecten dichos recursos.

**Artículo 90.-** La Secretaría, en coordinación con la Secretaría de Salud, expedirán las normas oficiales mexicanas para el establecimiento y manejo de zonas de protección de ríos, manantiales, depósitos y en general, fuentes de abastecimiento de agua para el servicio de las poblaciones e industrias, y promoverá el establecimiento de reservas de agua para consumo humano.

**Artículo 92.-** Con el propósito de asegurar la disponibilidad del agua y abatir los niveles de desperdicio, las autoridades competentes promoverán el ahorro y uso eficiente del agua, el tratamiento de aguas residuales y su reúso.

### ***c) Agenda del Agua 2030 (CONAGUA)***

La Agenda del Agua 2030 es un instrumento para la cabal implementación de una política de sustentabilidad hídrica. Con ella deben alinearse los Programas Nacionales Hídricos, los Programas Regionales Hídricos, las carteras de inversiones del gobierno federal y de los gobiernos de los estados, los

presupuestos de egresos fiscales en materia hídrica y los programas de cultura del agua.

### ***¿Qué es la Agenda del Agua 2030?***

**a) Es un método de trabajo:** La Agenda del Agua 2030 (AA2030) postula una estrategia de largo plazo, cuyos avances deberán ser revisados anualmente y sus resultados e impactos habrán de ser valorados cada seis años como base para su correspondiente actualización, de modo de dotar permanentemente al sistema nacional de gestión del agua de una adecuada orientación estratégica de largo plazo.

**b) Es un instrumento para la consolidación de una política de sustentabilidad hídrica:** La Agenda del Agua 2030 define la naturaleza y magnitud de los desafíos a superar y de las soluciones a desplegar para poder efectivamente entregar a la siguiente generación un país con más fortalezas y oportunidades que las existentes en el momento presente.

**c) Es un ejercicio prospectivo de gran visión:** La Agenda del Agua 2030 plantea en primer término una visión: hacer realidad en un lapso de veinte años un país con ríos limpios, cuencas y acuíferos en equilibrio, cobertura universal de agua potable y alcantarillado, y asentamientos seguros frente a inundaciones catastróficas. Define la brecha existente entre tal visión y la realidad actual y prioriza las líneas de acción que es necesario desplegar para tal efecto. Finalmente identifica los cambios que es necesario generar en el entorno institucional para dar viabilidad a cada uno de sus componentes. Cambios estratégicos en tópicos como organización institucional, planeación, legislación, reglamentación, financiamiento, educación, capacitación y otros de similar naturaleza son abordados.

**d) Es un conjunto de iniciativas que capitaliza la experiencia nacional e internacional:** La Agenda del Agua 2030 asume como válidos los planteamientos conceptuales y metodológicos surgidos de las reuniones internacionales

celebradas en las últimas dos décadas en materia de desarrollo sustentable en general y de uso sustentable de los recursos hídricos en particular. Especial importancia le concede a los conceptos de gobernanza, gestión integrada de los recursos hídricos y gestión de cuencas y acuíferos.

**e) Es un instrumento que alienta una conducta solidaria:** La Agenda del Agua 2030 es un instrumento que promueve una actitud solidaria entre los mexicanos de las diversas regiones y localidades del país en el momento presente y de la generación actual respecto de las generaciones futuras. Alienta también la acción concurrente de todas las instituciones - gubernamentales y no gubernamentales- en los ámbitos nacional, regional y local.

**f) Es una iniciativa generadora de cultura:** La Agenda del Agua 2030 debe entenderse también como una práctica generadora de una cultura de sustentabilidad hídrica. Un instrumento para difundir y dar testimonio de valores tales como la unidad, la responsabilidad y la solidaridad. Y un instrumento que impacte positivamente en las creencias generalizadas respecto de la capacidad que tenemos como país, como regiones y como localidades para crear el futuro que queremos.

**g) Es parte del sistema nacional de planeación hídrica:** La Agenda del Agua 2030 no agota la planeación nacional del agua, sino que es una parte de esta; tiene como insumos las definiciones de política de desarrollo, las definiciones de política en materia de agua y los resultados de los análisis de carácter técnico. A su vez la AA2030 es un insumo fundamental para la realización de ajustes de carácter estructural en el sistema nacional de gestión del agua, y para la conformación de las carteras de proyectos en materia de agua en los ámbitos nacional, regional y local. Así concebida la Agenda del Agua 2030 contiene los siguientes elementos:

- a) La visión sobre la realidad a construir en el largo plazo en materia de agua.
- b) El dimensionamiento de los problemas a superar para hacer realidad dicha visión.

- c) Los principios y líneas estratégicas necesarias para alcanzar los objetivos.
- d) La identificación de los cambios necesarios en el arreglo institucional para hacer viables todos los componentes de la visión.

### ***Una visión prospectiva del agua al año 2030***

La desigual disponibilidad del agua en el territorio nacional, la dinámica poblacional, el desarrollo de las actividades económicas, los asentamientos urbanos desordenados, la degradación de las cuencas, la sobreexplotación de los acuíferos y los efectos de las sequías e inundaciones, constituyen la problemática principal del sector hídrico en México, cuya tendencia a futuro pone en riesgo la sustentabilidad de los recursos hídricos. A continuación se enlistan algunos datos relevantes que permiten entender su situación actual:

- La disponibilidad natural media per-cápita del agua se ha reducido drásticamente en los últimos años, pasando de 18 mil metros cúbicos por habitante por año en 1950 a sólo 4,422 metros cúbicos por habitante por año en el 2010, debido al crecimiento de la población, considerándose esta última cifra como una disponibilidad baja.
- La lluvia promedio que se presenta anualmente en el territorio nacional es de 760 milímetros; sin embargo, estos promedios nacionales ocultan grandes diferencias regionales, ya que estados como Baja California, recibe una precipitación de apenas 176 milímetros anuales, mientras que Tabasco recibe más de 2,100 milímetros, lo cual genera problemas de escasez en algunas regiones y exceso e inundaciones en otras.
- La mayor parte de la lluvia se presenta entre los meses de junio y septiembre, ocurriendo muchas veces de manera torrencial, con grandes volúmenes en muy poco tiempo, dificultando con ello su aprovechamiento.
- El país presenta desequilibrio entre disponibilidad hídrica y demanda. El 77% de la población nacional se concentra en las regiones donde se cuenta solo con el 31% de la disponibilidad natural media.

- Tenemos un problema de variación temporal y espacial de la lluvia y por consiguiente también del agua que podemos utilizar sustentablemente para los diversos usos.
- Existen 653 acuíferos, de los cuales 101 presentan condiciones de sobreexplotación.
- Otro de los grandes retos que tiene nuestro país consiste en recuperar la calidad del agua de ríos y lagos, ya que gran parte del agua superficial presenta algún grado de contaminación.
- El 91.3% y 89.9% de la población nacional cuenta con los servicios de agua potable y alcantarillado respectivamente.
- Tenemos una superficie de riego agrícola de 6.5 millones de hectáreas.
- Año con año, nuestro país sufre el embate de ciclones que ocasionan cuantiosos daños.

En este contexto, es necesario enfocar todos los esfuerzos hacia un manejo del agua que garantice su sustentabilidad en el largo plazo.

### ***Los desafíos a largo plazo***

Con objeto de definir los lineamientos estratégicos para lograr la sustentabilidad de los recursos hídricos, visión de la Agenda del Agua 2030, se ha trabajado con gran intensidad en llevar a cabo rigurosos escenarios prospectivos en cada una de las 13 regiones hidrológico-administrativas del país. Por ello, durante el año 2010 se realizó el “Análisis de alternativas para el uso sustentable del agua en el mediano y largo plazos”, mismo que permitió:

- Determinar la brecha que se generaría entre demanda y oferta sustentable de agua en los próximos 20 años.
- Identificar las alternativas de solución.
- Estimar los costos para orientar las decisiones de inversión en el sector a nivel regional y nacional. Para el análisis de alternativas se desarrolló una herramienta integral que consideró una amplia gama de fuentes de

información de dependencias federales, estatales y organizaciones de usuarios del agua.

### **3.1.2 Nivel Estatal**

#### **a) Plan de Desarrollo del Estado de México 2011-2017**

##### **Infraestructura hidráulica**

En materia de recursos hidráulicos, cabe mencionar que la cobertura de agua entubada asciende a 94% y la de drenaje a 93.6%. Existe por tanto un importante espacio de oportunidad en la mejora de dichos servicios así como para atender los efectos derivados tanto de la aparición de nuevos asentamientos humanos como de los efectos del cambio climático. Actualmente se ofertan 40 m<sup>3</sup>/s de agua para uso público-urbano en el Estado de México, aproximadamente 223 litros por habitante al día en promedio. Para coadyuvar con lo anterior recientemente terminó la construcción del Macrocircuito de Distribución de Agua Potable, sistema que permitirá abastecer a los municipios del oriente del Valle de México y abatir el déficit que se registra. Sin embargo, adicionalmente es necesario que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) suministre los caudales provenientes del Sistema Cutzamala a los que el Estado de México tiene derecho. De dicho caudal ofertado, 33.3 m<sup>3</sup>/s (84.9%) provienen de los nueve acuíferos que se ubican en el territorio estatal, sin embargo, cabe advertir que los más importantes como el del Valle de México presenta una sobreexplotación de 74%, el del Valle de Toluca de 25% y el de Texcoco de 858%.

Esta situación ha provocado constantes hundimientos diferenciales del suelo, principalmente en el Valle de México, lo cual ha afectado la infraestructura urbana e hidráulica. A la fecha se perforan pozos a una profundidad de 400 m y en varios se presentan problemas en la calidad del agua encareciendo su aprovechamiento, condición que seguirá incrementándose con el paso del tiempo.



### ***Desarrollo sustentable***

- Proteger el agua para garantizar el acceso al vital líquido y fomentar el desarrollo sustentable.
- Fortalecer las acciones para garantizar la disponibilidad de agua, frenar la degradación, sobreexplotación y contaminación de cuencas y acuíferos.
- Monitorear la calidad del agua en los acuíferos, cuerpos de agua y corrientes
- Fomentar actividades que utilicen el agua de forma racional y eficiente.
- Apoyar la investigación tecnológica para el aprovechamiento y reutilización del agua en los valles de México y Toluca.
- Desarrollar sistemas integrales de uso, tratamiento y recuperación de aguas residuales domésticas e industriales, instalando la infraestructura necesaria para el aprovechamiento de caudales en la industria y para el riego.
- Promover programas de infiltración de aguas pluviales a los acuíferos, previa ubicación precisa de las zonas de recarga.

### ***b) Código para la biodiversidad del Estado de México***

Este código es un instrumento jurídico en el cual se plasman diferentes temáticas en cuestión a la protección del ambiente del Estado de México, la temática a desarrollar dentro de este apartado es sobre el agua.

### **Libro segundo: del equilibrio ecológico, la protección al ambiente y el fomento al desarrollo sostenible**

#### **Título Primero: disposiciones generales**

**Artículo 2.1.** El presente Libro tiene por objeto regular las acciones a cargo del Estado y los municipios en materia de conservación, preservación, recuperación, rehabilitación y remediación de los ecosistemas, de la restauración del equilibrio ecológico, de la protección al ambiente, del uso y aprovechamiento sostenible de los elementos naturales del material genético, de los recursos naturales, del

material genético y de los bienes ambientales, así como de la distribución en forma equitativa de los costos y beneficios derivados en el marco de las políticas establecidas para el fomento al desarrollo sostenible.

**Artículo 2.2.** Son objetivos específicos de este Libro:

III. Establecer criterios ambientales para el manejo de los recursos y elementos de la naturaleza para la prevención y control de la contaminación del agua, aire y suelo logrando ordenar ecológicamente el territorio de la Entidad, mediante la preservación del patrimonio natural del Estado y de los procesos ambientales esenciales, de los que depende la supervivencia de los ecosistemas, considerados de forma integral.

IV. Promover la cultura ambiental y el conocimiento público sobre la conservación, restauración y la utilización responsable de la biodiversidad.

X. La prevención y control de la contaminación de las aguas de jurisdicción del Estado y de las aguas nacionales que estén asignadas o concesionadas al Gobierno del Estado y la regulación de su aprovechamiento y uso sostenible.

XI. El control y prevención de las actividades que propicien contaminación de las aguas federales que el Estado o los Municipios tengan asignadas o concesionadas para la prestación de servicios públicos y de las que se descarguen en las redes de alcantarillado de los centros de población, sin perjuicio de las facultades de la Federación en materia de tratamiento, descarga, infiltración y reúso de aguas residuales conforme a las disposiciones aplicables.

XXII. Preservar y proteger el agua, el suelo, el aire, la fauna y la flora para impedir las prácticas que coloquen en riesgo su función ecológica y que provoquen cualquier deterioro o daño a los ecosistemas.

**Artículo 2.3.** Se considera de orden público e interés social:

VII. La prevención y el control de la contaminación del aire, del agua y del suelo en el territorio del Estado.

### **Libro tercero: del agua**

En el Libro Tercero se norma claramente todo lo relativo a la administración de las aguas de jurisdicción estatal. La creación, establecimiento y actualización del Sistema Estatal del Agua. La organización y atribuciones de las autoridades estatales y municipales en la administración del agua de jurisdicción estatal y la coordinación respectiva con los sectores de usuarios. La prestación total o parcial, por los sectores social y privado, de los servicios públicos de suministros de agua potable, drenaje y tratamiento de aguas residuales.

#### **3.1.3 Nivel Municipal**

##### **a) Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Lerma (PMDUL) 2013-2015**

##### **Infraestructura hidráulica**

En cuestiones de infraestructura hidráulica el municipio de Lerma, obtiene agua potable de manera superficial y subterránea; se abastece por medio de los sistemas Lerma, San Pedro Tultepec y Toluca-Lerma, y por medio de 5 pozos profundos.

Dentro del plan se menciona que este líquido se reparte de manera diferente para algunas localidades; pues cabe mencionar que solo se tienen destinados de 150 a 195 litros por día para la población en general, para la Cabecera Municipal y el Fraccionamiento Club de Golf Los Encinos se destinan 110 litros por segundo, con la ayuda del pozo no.1 y de dos rebombes del sistema Lerma, finalmente para la zona industrial se tienen contemplados 8,052.48 m<sup>3</sup> por día, cubriéndose en su totalidad la zona.

Con lo anterior podemos observar que dentro del municipio existe una muy mala distribución de agua potable, y claro está que no solo sucede en el municipio de Lerma, la inadecuada distribución existe a nivel nacional. Mientras unas cuantas personas gozan de la adquisición del agua potable y además esta es desperdiciada en su gran mayoría, y muchas otras personas se ven limitadas en cuanto al uso de este recurso.

### ***Agua y saneamiento***

#### ***Importancia del agua***

Es un recurso vital e insustituible para las actividades humanas. La disponibilidad del líquido en una región depende de su localización geográfica, clima, vegetación y características geológicas. Para un uso racional del preciado líquido es necesario tener siempre presente el ciclo hidrológico, es decir, la cantidad de agua que se precipita e infiltra en el subsuelo, la evaporación de ríos, lagos y lagunas, la transpiración de las plantas y después de ser utilizada en diferentes actividades regresa a esa sucesión interminable del agua. Las actividades humanas han modificado sus características originales convirtiéndola en un recurso no renovable en términos de su calidad o pureza.

#### ***Agua Potable***

De acuerdo a las Estadísticas de la Secretaría de Desarrollo Urbano del Gobierno del Estado de México, el consumo doméstico promedio en litros por habitante por día hasta octubre de 2012 fue:

- En la zona rural 177 lts/hab/día.
- En la zona popular entre 200 lts/hab/día.
- En la zona residencial de 248 lts/hab/día.

El Censo de Población y Vivienda 2010, contabiliza 31 mil 149 viviendas localizadas en el municipio de Lerma, de las cuales 28 mil 357 disponían de agua

potable, lo que representa 91.03% del total de viviendas, es decir, existe un déficit considerable.

Considerando que el gasto promedio es de 248 lts/hab/día hasta octubre de 2012, el volumen de consumo de agua potable por toma domiciliaria en el municipio está representada por un gasto de 1.07 m<sup>3</sup>/día. En la tabla 3.1 se muestran los usos del agua dentro del municipio, así como las descargas existentes.

**Tabla 3.1 Usos y descargas del agua en el municipio de Lerma**

| <b>Usos y descargas del agua en el municipio de Lerma</b> |  |
|---|--|
| Aprovechamiento   | Se extraen 114,740 m <sup>3</sup> /día (49,940 m <sup>3</sup> /día para Lerma y 64,800 m <sup>3</sup> /día se exportan al D.F.)  |
| Usos del agua   | 33,480 m <sup>3</sup> /día para uso público urbano, 11,760 m <sup>3</sup> /día para uso industrial, 3,800 m <sup>3</sup> /día para uso agropecuario, 900 m <sup>3</sup> /día para uso comercial y 64,800 m <sup>3</sup> /día se exportan al D.F. |
| Aguas residuales  | 38,016 m <sup>3</sup> /día generado.   |
| Aguas residuales con tratamiento                          | 7,573 m <sup>3</sup> /día= cobertura de 22.97% (87 lts/s) el resto se descarga a los cuerpos de agua sin ningún tratamiento.   |
| Extracción de aguas subterráneas                          | 41,880.100 m <sup>3</sup> /año (1.32 m <sup>3</sup> /s).   |

Fuente: Retomado de CAEM, 2012

### **3.2 Marco Jurídico sobre la calidad y purificación del agua**

La calidad del agua es un factor determinante de la salud pública y de los ecosistemas, que restringe la oferta de agua y su distribución potencial para los diferentes usos. El agua está asociada a la transmisión de enfermedades que afectan la salud humana, ya sea por ingestión directa o mediante la contaminación de alimentos, por lo que su calidad está absolutamente relacionada con la calidad de vida de la población (WWDR, 2003).

Como se mencionó dentro del planteamiento del problema, el agua en épocas actuales está enfrentando desafíos sobre su calidad y cantidad. Hoy en día, existe una gran dificultad para que millones de personas tengan acceso al agua potable y sobre todo a que esta llegue en condiciones adecuadas para su consumo, de igual manera también se mencionó la alternativa para minimizar esta problemática la

cual es la utilización de tratamientos biológicos, para conseguir que esta fuera consumida por los humanos. Para poder llegar a esto, fue necesario estudiar diferentes normas que nos señalan las características que debe de tener el agua para poder ser potable.

Es por esta razón que es importante que exista una evaluación y un monitoreo continuo sobre la calidad que presenta el agua que es distribuida a los hogares de nuestro país, para evitar un desequilibrio de la salud humana.

En el año 2000, en México se utilizaban diversos indicadores para la evaluación de la calidad del agua:

- La concentración de coliformes fecales en agua dulce.
- El porcentaje de cuerpos de agua dulce que contienen coliformes fecales en niveles mayores que los recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS).
- La demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ), parámetro que mide la cantidad de oxígeno que consume la descomposición de la materia orgánica.
- El índice de Calidad del Agua (ICA), que es un valor en una escala de 0 a 100%, indica el grado de contaminación de un cuerpo de agua y se obtiene a partir de un promedio ponderado de los índices de calidad individuales de 18 parámetros (CNA, 2001) . Un mayor ICA indica menor contaminación.
- El nivel de tratamiento de agua residual de distinto origen indica el potencial de contaminación y la posibilidad de ser vertida en sistemas acuáticos sin daños a la salud de los ecosistemas (INE, 2000).

Otros elementos jurídicos de regulación de la calidad son algunas normas oficiales mexicanas (NOM) que definen las características físicas, biológicas y químicas en las que se deberían de basar los análisis del agua para considerar si cumple o no con las condiciones deseables para determinados usos.

Con lo que respecta al estudio de tratamiento de agua fue útil recurrir a la Norma Oficial Mexicana: NOM-127-SSA1-1994 *"salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización"*.

De igual manera se utilizó la Norma Mexicana nmx-aa-044-scfi-2014 *"análisis de agua.- medición de Cromo hexavalente en aguas naturales, salinas, residuales y residuales tratadas- método de prueba"*.

Otra Norma de referencia es la Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996, *"Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal"*.

Se utilizaron estas normas porque en ella se exponen los límites permisibles que debería tener el agua para ser considerada de buena calidad, hablando en términos del consumo humano.

A continuación se hablará de manera más específica de cada una de estas normas.

### **3.2.1 Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994**

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características bacteriológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas.

Con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor, se debe someter a tratamientos de potabilización. (Nom-127-ssa1-1994)

Se utilizó esta Norma Oficial Mexicana Nom-127-ssa1-1994 “salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”, porque esta es la que más se acerca con la temática de investigación, cumple con las características que se necesitan para poder contrastar los resultados obtenidos al finalizar este estudio. De igual manera facilitó los parámetros físicos, bacteriológicos y químicos que debe de poseer el agua para hacerse llamar de calidad.

Comparando con otras normas, la NOM-127-SSA1-1994 es la única que aborda el tema de la calidad del agua contrastándola con la salud humana, la cual es la principal beneficiada o afectada al momento de que existe una alteración en la estructura del recurso agua, también maneja las formas de potabilización a las cuales se puede someter el agua para su adecuada purificación.

Cabe mencionar que para evitar la existencia de enfermedades en la humanidad es común evaluar la calidad del agua potable en relación con lineamientos o normas específicas que varían con el tiempo y con el país.

Los parámetros más representativos a la hora de evaluar la calidad del agua potable se clasifican en cinco grupos:

**a) Parámetros organolépticos.** Son características apreciadas por el consumidor, tales como el: color, olor, sabor y turbiedad; pueden no tener relación alguna con la salud (Jiménez, 2001).

**b) Parámetros físico-químicos.** Son: pH, conductividad, sólidos totales, alcalinidad, dureza, oxígeno disuelto, cloro residual, etcétera; miden tanto contaminantes como propiedades de interés para el tratamiento, conducción o almacenamiento del agua (Jiménez, 2001).



- c) *Sustancias indeseables en cantidades excesivas.*** Son compuestos que pueden ser dañinos, que causan problemas de olor y sabor si rebasan cierto nivel, por ejemplo: dureza, fluoruros, fenoles, cloruros, hierro y manganeso (Jiménez, 2001).
- d) *Sustancias tóxicas.*** Existe amplia variedad de compuestos químicos orgánicos e inorgánicos y que son tóxicos para el hombre, la gravedad depende de la dosis recibida, el período de exposición y otros factores ambientales. Entre estos constituyentes se encuentran el arsénico, cianuros, mercurio, los hidrocarburos aromáticos policíclicos, los compuestos órgano-clorados y órgano-fosforados (plaguicidas) (Jiménez, 2001).
- e) *Parámetros microbiológicos.*** Estos parámetros son los más importantes para determinar la potabilidad del agua, por ejemplo: coliformes fecales, huevos de helmitos, vibrio cholerae, virus, etc. Las normas se basan, esencialmente, en la necesidad de asegurar la ausencia de bacterias indicadoras de contaminación por desechos humanos, es decir, que el agua esté libre de coliformes fecales (Jiménez, 2001).

A continuación se muestran los límites permisibles de calidad del agua, obtenidos de la Nom-127-ssa1-1994.

**a) *Límites permisibles de características bacteriológicas***

El contenido de organismos resultantes del examen de una muestra simple de agua, debe ajustarse a lo establecido en la Tabla 3.2

**Tabla 3.2 Límites permisibles de características bacteriológicas**

| Característica                | Límite permisible        |
|-------------------------------|--------------------------|
| Organismos coliformes totales | 2 NMP/100 ml             |
|                               | 2 UFC/100 ml             |
| Organismos coliformes fecales | No detectable NMP/100 ml |
|                               | Cero UFC/100 ml          |

Fuente: Elaboración propia, tomando información de la Norma oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994

Los resultados de los exámenes bacteriológicos se deben reportar en unidades de NMP/100 ml (número más probable por 100 ml), si se utiliza la técnica del número más probable o UFC/100 ml (unidades formadoras de colonias por 100 ml), si se utiliza la técnica de filtración por membrana.

***b) Límites permisibles de características físicas y organolépticas***

Las características físicas y organolépticas deberán ajustarse a lo establecido en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3. Límites permisibles de características físicas y organolépticas**

| Característica | Límite permisible  |
|----------------|--|
| Color          | 20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto   |
| Olor y Sabor   | Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico). |
| Turbiedad      | 5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.  |

Fuente: Elaboración propia, tomando información de la Norma oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

***c) Límites permisibles de características químicas***

El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 3.4. Los límites se expresan en mg/l (miligramo por litro), excepto cuando se indique otra unidad.

**Tabla 3.4. Límites permisibles de características químicas**

| <b>Característica</b>  | <b>Límite permisible</b> |
|--|--------------------------|
| Aluminio   | 0.20                     |
| Arsénico   | 0.05                     |
| Bario  | 0.70                     |
| Cadmio   | 0.005                    |
| Cianuros (como CN <sup>-</sup> )   | 0.07                     |
| Cloro residual libre   | 0.2-1.50                 |
| Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )   | 250.00                   |
| Cobre  | 2.00                     |
| Cromo total  | 0.05                     |
| Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )                                   | 500.00                   |
| Fenoles o compuestos fenólicos   | 0.001                    |
| Fierro   | 0.30                     |
| Fluoruros (como F <sup>-</sup> )   | 1.50                     |
| Manganeso  | 0.15                     |
| Mercurio   | 0.001                    |
| Nitratos (como N)  | 10.00                    |
| Nitritos (como N)  | 0.05                     |
| Nitrógeno amoniacal (como N)   | 0.50                     |
| pH (potencial de hidrógeno) en unidades de Ph                            | 6.5-8.5                  |
| Plaguicidas en microgramos/l: Aldrín y dieldrín (separados o combinados) | 0.03                     |
| Clordano (total de isómeros)   | 0.30                     |
| DDT (total de isómeros)  | 1.00                     |
| Gamma-HCH (lindano)  | 2.00                     |
| Hexaclorobenceno   | 0.01                     |
| Heptacloro y epóxido de heptacloro                                       | 0.03                     |
| Metoxicloro  | 20.00                    |
| 2,4 – D  | 50.00                    |
| Plomo  | 0.025                    |
| Sodio  | 200.00                   |
| Sólidos disueltos totales  | 1000.00                  |
| Sulfatos (como SO <sub>4</sub> )   | 400.00                   |
| Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)                            | 0.50                     |
| Trihalometanos totales   | 0.20                     |
| Zinc   | 5.00                     |

Fuente: Elaboración propia, tomando información de la Norma oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994

Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos.

Parámetros químicos considerados dentro de la purificación del agua, obtenidos del Reglamento de los requisitos oficiales físicos, químicos y bacteriológicos que deben reunir las aguas para ser consideradas potables.

a) El agua no debe contener exceso de mineral soluble ni exceso de las sustancias químicas que se emplean para tratarlas.

b) La presencia de plomo en exceso de 0.1 ppm (miligramos por litro), de flúor en exceso de 2 ppm, de arsénico en exceso de 0.1 ppm, de selenio en exceso de 0.05 ppm constituye razón para rechazar el agua.

c) Las siguientes sustancias químicas será preferible que no se encuentren en el agua en cantidad mayor que la que se señala.

- Cobre (Cu) no más de 3.00 ppm
- Hierro y Manganeseo juntos no más de 0.5 ppm
- Magnesio (Mg) no más de 125 ppm
- Zinc (Zn) no más de 15 ppm
- Cloruros (Cl) no más de 250 ppm
- Sulfatos (SO<sub>4</sub>) no más de 250 ppm
- Sólidos totales hasta 1,000 ppm preferiblemente 500 ppm
- En aguas tratadas el pH (potencial de Hidrógeno) no debe ser mayor de 10.6 y la alcalinidad debida a carbonatos no excederá de 120 ppm

Como podemos observar existen diversas características con las cuales nos podemos auxiliar para comprobar si el agua es adecuada para el consumo humano y que no pueda ocasionar alteraciones a la salud.

Y ahora cada vez que bebamos agua nos preguntaremos si cumple con cada uno de los parámetros anteriores, para que sea de buena calidad y no nos ocasione problemas en nuestra salud.

Es por esta razón que la temática de la calidad del agua debe de ser más importante para los sistemas de distribución de agua potable.

#### **d) Límites permisibles de características radiactivas**

El contenido de constituyentes radiactivos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 3.5. Los límites se expresan en Bq/l (Becquerel por litro).

**Tabla 3.5. Límites permisibles de características radiactivas**

| <b>Característica</b>     | <b>Límite permisible</b> |
|---------------------------|--------------------------|
| Radiactividad alfa global | 0.1                      |
| Radiactividad beta global | 1.0                      |

Fuente: Elaboración propia, tomando información de la Norma oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

#### **3.2.2 Norma Mexicana nmx-aa-044-scfi-2014**

Esta norma mexicana establece el método de análisis para la medición de Cromo hexavalente en aguas naturales, salinas, potables, residuales y residuales tratadas. Es de aplicación nacional.

##### ***Principio del método***

El método se basa en una reacción donde el Cromo hexavalente Cr+6 reacciona con la 1,5-difenilcarbazida en medio ácido para dar un complejo color rojo violeta de composición desconocida que es determinado espectrofotométricamente a 540 nm. La intensidad de color es directamente proporcional a la concentración de Cromo hexavalente.

#### **3.2.3 Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996**

En esta norma se mencionan los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, y dentro de estos contaminantes se encuentra el Cromo Hexavalente.

Los límites máximos permisibles para contaminantes de las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, no deben ser superiores a los indicados en la Tabla 3.6. Para las grasas y aceites es el promedio ponderado en función del caudal, resultante de los análisis practicados a cada una de las muestras simples (NOM-002-ECOL-1996, s.f.).

**Tabla 3.6. Límites máximos permisibles para contaminantes de las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal**

| <b>Límites máximos permisibles de contaminantes</b>                    |                  |                 |             |
|--|------------------|-----------------|-------------|
| Parámetros (miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra). | Promedio Mensual | Promedio Diario | Instantáneo |
| Grasas y aceites   | 50               | 75              | 100         |
| Sólidos Sedimentables (mililitros por litro)                           | 5                | 7.5             | 10          |
| Arsénico Total   | 0.5              | 0.75            | 1           |
| Cadmio Total   | 0.5              | 0.75            | 1           |
| Cianuro Total  | 1                | 1.5             | 2           |
| Cobre Total  | 10               | 15              | 20          |
| Cromo Hexavalente  | 0.5              | 0.75            | 1           |
| Mercurio Total   | 0.01             | 0.015           | 0.02        |
| Níquel Total   | 4                | 6               | 8           |
| Plomo Total  | 1                | 1.5             | 2           |
| Zinc Total   | 6                | 9               | 12          |

Fuente: Elaboración propia 2015, tomando información de la Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996

Los límites máximos permisibles establecidos en la columna instantáneo, son únicamente valores de referencia, en el caso de que el valor de cualquier análisis exceda el instantáneo, el responsable de la descarga queda obligado a presentar a la autoridad competente en el tiempo y forma que establezcan los ordenamientos legales locales, los promedios diario y mensual, así como los resultados de laboratorio de los análisis que los respaldan (NOM-002-ECOL-1996, s.f.).

# Capítulo 4: Metodología y Resultados

#### 4.1 Diagrama del diseño experimental

Las actividades realizadas en el desarrollo experimental del presente trabajo de investigación se llevaron a cabo conforme a lo planteado en la Figura 4.1. Del presente trabajo, sin embargo la identificación con el Microscopio Electrónico de Barrido, no se tenía contemplada, sin embargo se incluyó dentro de la metodología realizada con la finalidad de observar la estructura superficial del biomaterial antes y después de haberse sometido al paso de las diferentes soluciones de Cr (VI), y a diferentes tiempos, lo cual resultó de vital importancia en esta investigación.

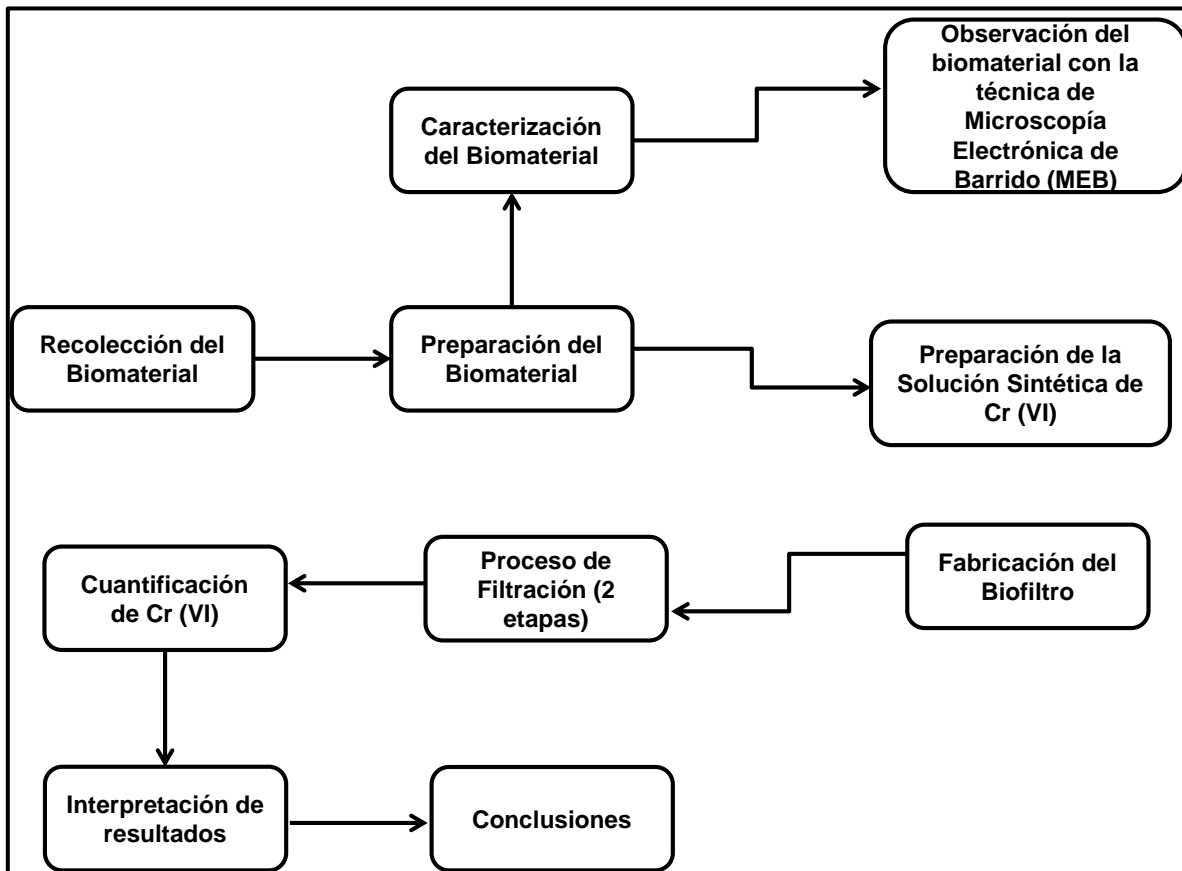


Figura 4.1. Diagrama experimental de la investigación con la adición de la técnica de MEB

Fuente: Elaboración Propia, 2015



El trabajo de investigación fue llevado a cabo en la Facultad de Química de la UAEM y en las instalaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).

A continuación se presenta un desglose de las actividades realizadas en el laboratorio desde la recolección y tratamiento del biomaterial hasta su utilización, así como la cuantificación y predominio de especies de los iones Cromo obtenidos, y las imágenes proporcionadas por la técnica MEB

## **4.2 Desglose de Actividades**

### ***4.2.1 Recolección del Biomaterial***

El Biomaterial fue recolectado en San Lorenzo Huitzilapan, en esta zona se maneja como material de desecho. Por lo tanto la recolección resultó ser bastante sencilla. La cantidad final recolectada fue de 3 kilogramos.



**Figura 4.2 Lugar de recolección del biomaterial olote de Zea Mays (San Lorenzo Huitzilapan)**

### 4.3 Preparación del Biomaterial

#### 4.3.1 Secado

Una vez que se desgrano la mazorca, el biomaterial olote pasó por un proceso de secado natural, durante dos semanas al sol en un periodo de 4 horas diarias, esto con la finalidad de que el olote perdiera la humedad que contenía.



Figura 4.3. Secado de Mazorca sin desgranar



Figura 4.4. Olote y Mazorca



Figura 4.5. Secado del olote

### **4.3.2 Trituración**

Después del secado del biomaterial, el olote fue triturado en trozos pequeños, uniformes de tal manera que pudieran ser manejados dentro del sistema de filtrado. La trituración del olote se realizó de manera manual, utilizando un cuchillo de cocina y una tabla.



**Figura 4.6** Proceso de trituración del olote



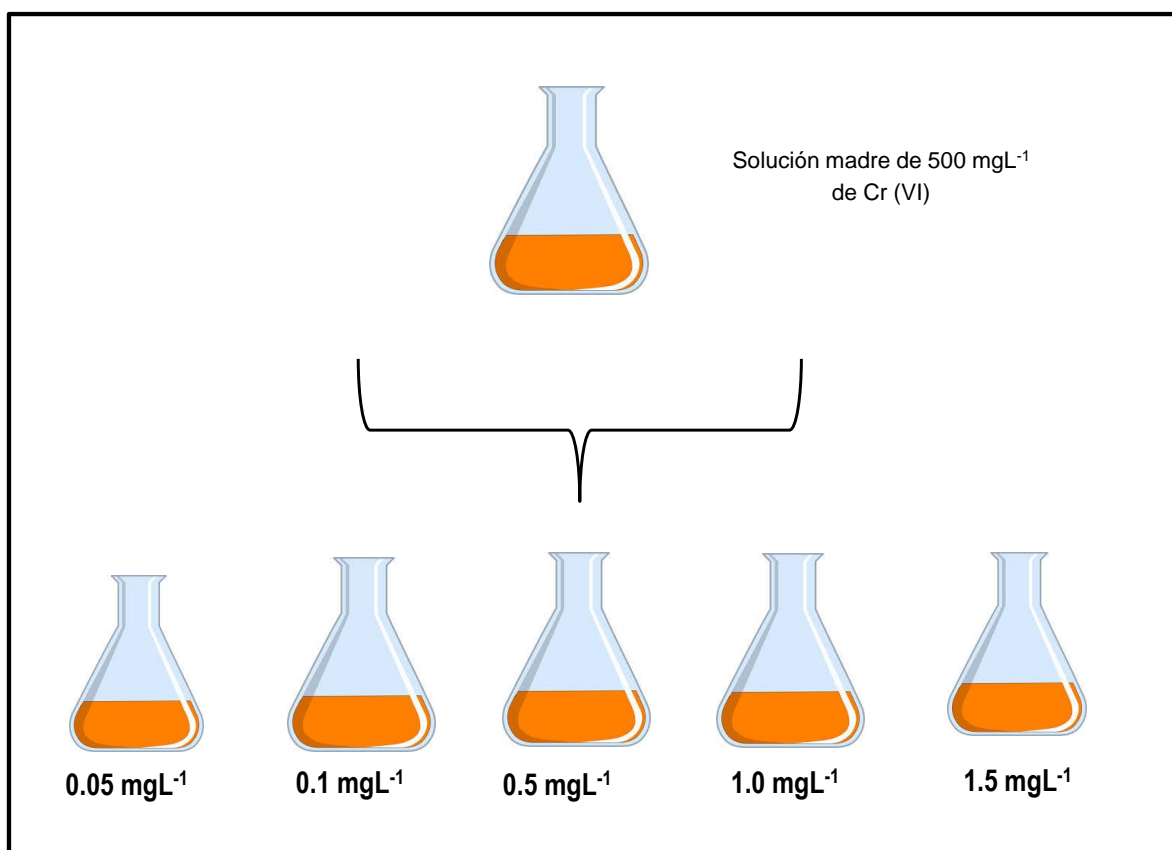
**Figura 4.7** Olote triturado para el sistema de filtrado

### **4.3.3 Caracterización del Biomaterial**

Se tomaron pequeñas muestras del biomaterial y se colocó en un soporte de grafito el cual se introdujo en un Microscopio Electrónico Philips XL-30 a bajo vacío, esto con la finalidad de obtener las micrografías de las muestras, así como el microanálisis correspondiente. Este procedimiento se repitió para el biomaterial después de realizar la correspondiente filtración, con el objetivo de comparar antes y después el comportamiento del experimento. Cabe señalar que este equipo se encuentra en las instalaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).

#### 4.3.4 Preparación de las soluciones sintéticas de Cr (VI) y ajuste de pH

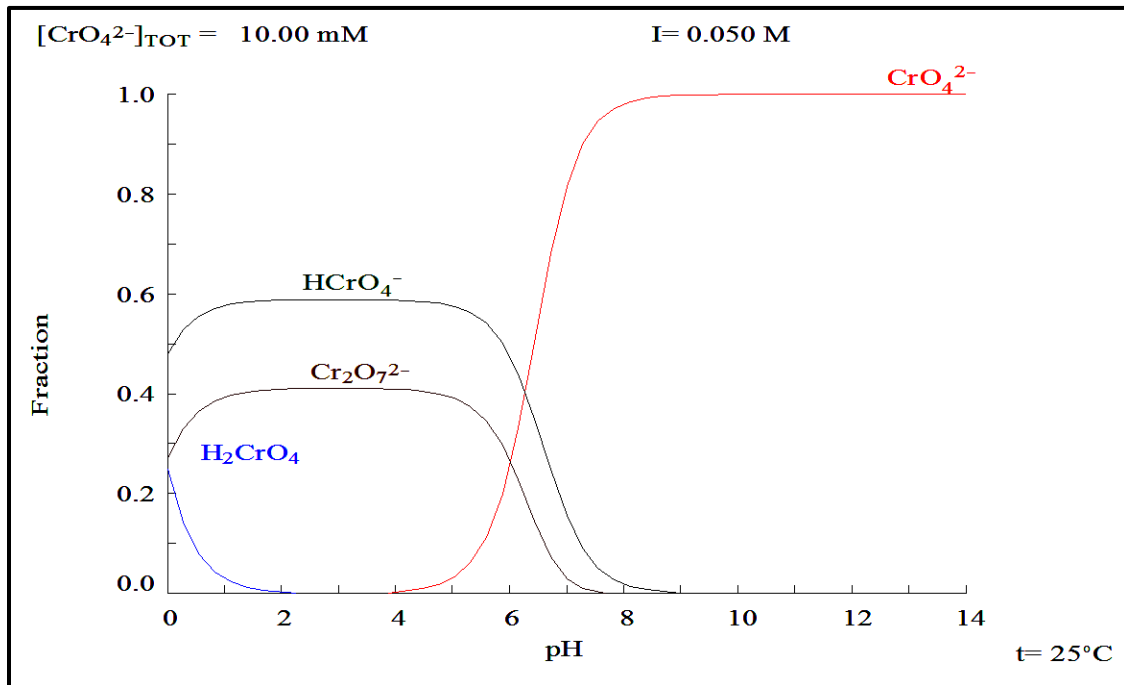
En este punto se prepararon soluciones sintéticas de Cr (VI) a las concentraciones de 0.05, 0.1, 0.5, 1.0 y 1.5 mgL<sup>-1</sup>. Para lo cual se pesaron 1.41 gr de K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> para generar una solución madre de 500 mgL<sup>-1</sup>, posteriormente mediante el método de diluciones se obtuvieron las soluciones a las concentraciones señaladas. Figura 4.8.



**Figura 4.8 Soluciones sintéticas de Cr (VI)**

Fuente: Elaboración propia, 2015

A cada una de ellas se le ajustó el pH a un valor de 4, agregando pequeños volúmenes de una solución ácida, ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Esto se llevó a cabo con base en el diagrama de predominio de especies que se generó mediante el programa de computación Medusa. Figura 4.9.

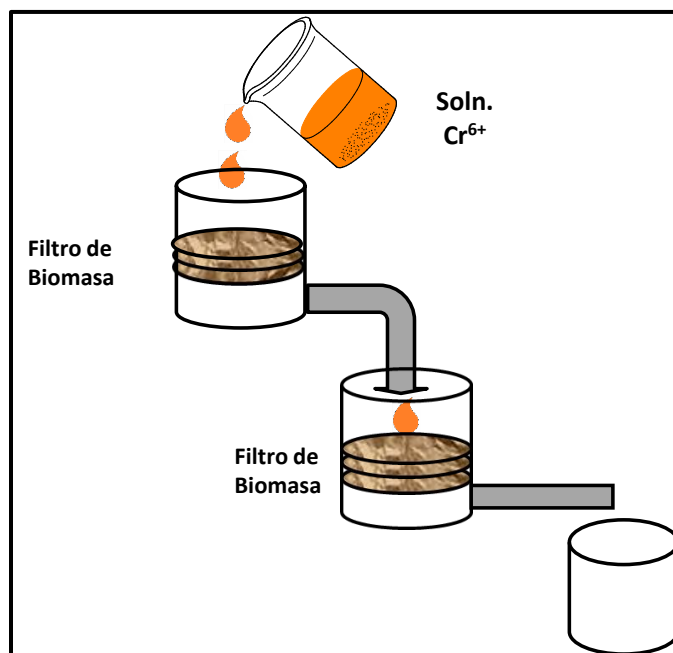


**Figura 4.9 Diagrama de predominio de especies**  
Fuente: Elaboración propia, 2015, utilizando el software medusa

#### 4.4 Fabricación de Biofiltro

En la elaboración del biofiltro, este se realizó de manera artesanal, se utilizaron materiales fáciles de conseguir, en este caso fueron 2 vasos de unicel y uno de plástico, 3 popotes y 2 coladeras de metal.

A los vasos se les efectuó un orificio a cada uno y en estos se le colocaron los popotes, por donde los cuales se transportado las concentraciones de la solución de Cr (VI), por otro lado a la mitad de los vasos se les coloco las coladeras, para que en estas se pudiera colocar el biomaterial, figura 4.10.

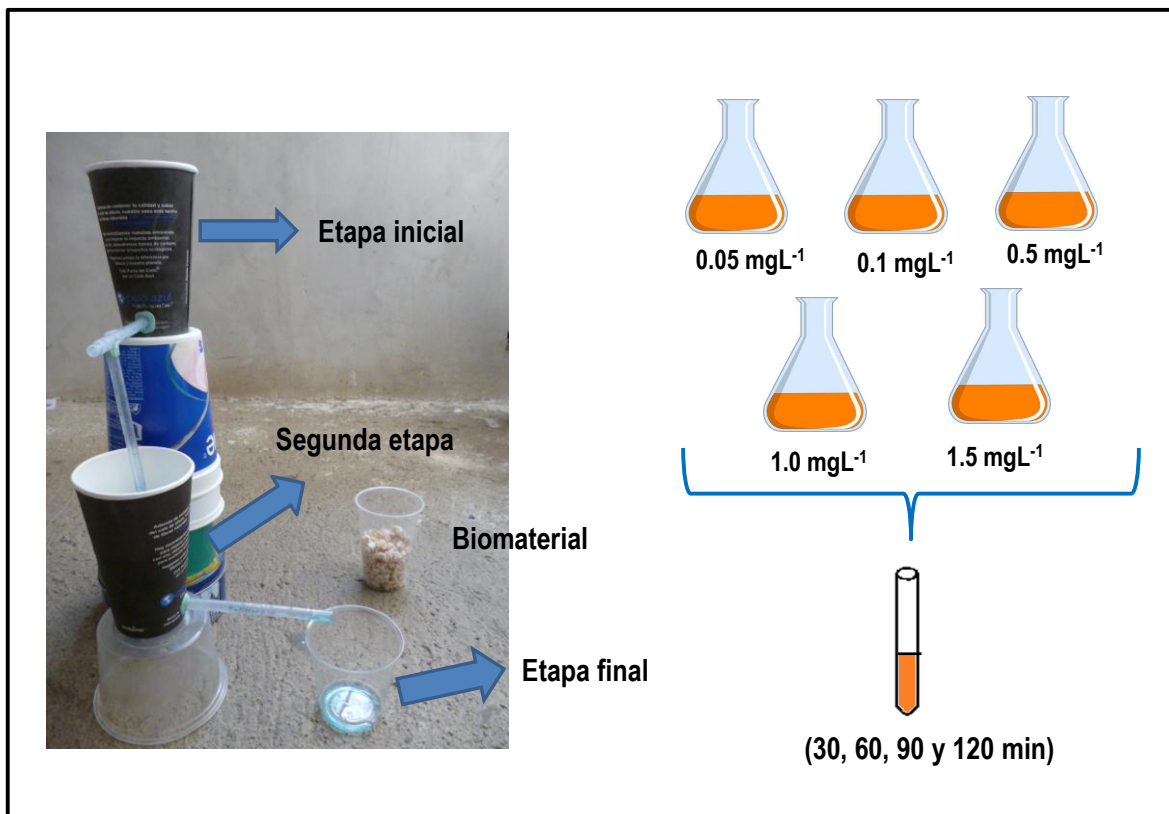


**Figura 4.10. Diseño del Biofiltro**  
Fuente: Elaboración Propia, 2015

#### 4.5 Proceso de Filtración

Una vez obtenido el biomaterial en el tamaño adecuado y de la fabricación del sistema de filtrado, se procedió a realizar la filtración de las diferentes concentraciones de Cr (VI), las cuales fueron (0.05, 0.1, 0.5, 1, y 1.5 mgL<sup>-1</sup>) a diferentes tiempos (30, 60, 90 y 120 minutos). Para esto a los dos principales vasos se les puso una rejilla a cada uno, también se les instaló un papel filtro, posterior a esto se colocó el biomaterial en una cantidad adecuada, una vez instalado todo esto, se continuó con lo que fue el filtrado de las concentraciones.

Como ya se mencionó anteriormente el proceso de filtrado se llevó a cabo a diferentes tiempos en los cuales en cada uno se obtuvo una muestra de la concentración de Cr (VI) una vez ya filtrada, es decir que se obtuvieron un total de 60 muestras. En la figura 4.11 se puede observar el sistema de filtrado que se propone para la filtración de las diferentes concentraciones de Cr (VI).



**Figura 4.11. Proceso de filtración**

Fuente: Elaboración propia, 2015

## 4.6 Cuantificación de Cr (VI) y Cr (III)

### 4.6.1 Preparación del complejo difenilcarbazida-Cr (VI)

Una vez recolectadas las soluciones filtradas a las concentraciones señaladas, se agregaron 2 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado, esto con la finalidad de ajustar el pH a un valor de 4, con esto se asegura que el complejo de difenilcarbazida-Cr (VI) se haya formado, posteriormente a todas las soluciones se les agregó una cantidad fija de difenilcarbazida que son 10 mL cuya concentración es de  $5 \text{ mgL}^{-1}$  ( 0.250 g en 50 mL de acetona), la formación del complejo se corrobora por la coloración violeta que adquirió la solución, como se muestra en la Figura 4.12.



**Figura 4.12. Complejo formado por Cr (VI)-difenilcarbazona**

#### ***4.6.2 Cuantificación del complejo difenilcarbazona-Cr (VI)***

De las soluciones generadas de la filtración se cuantificó el Cromo hexavalente, mediante espectrofotométrica en un equipo de UV Lambda Perkin Elmer , que se observa en la Figura 4.13 esto se logra colocando en un tubo de ensayo, 5 mL de la solución muestra, 2 mL de una solución de  $H_2SO_4$  0.2 N, 1 mL de la solución de difenilcarbazona, lo que provocó que se haya formado el complejo ya mencionado.



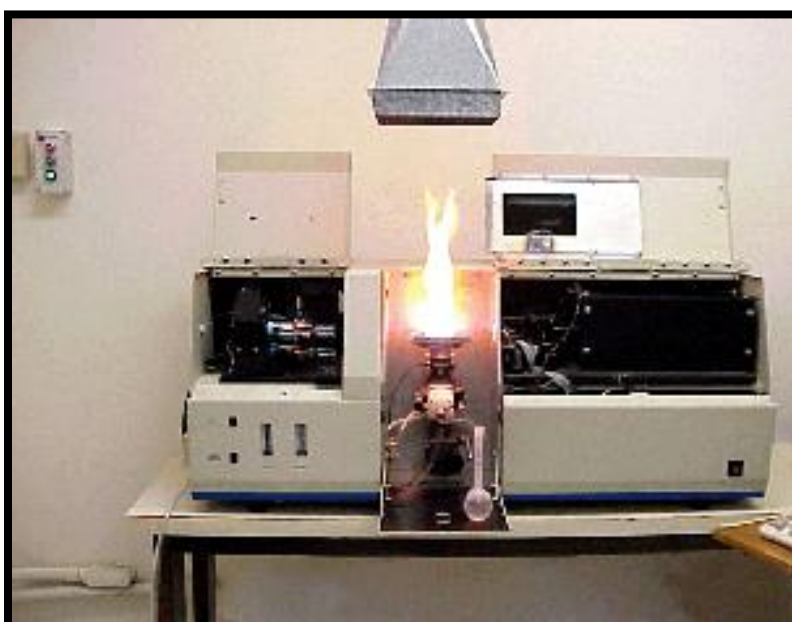
**Figura 4.13. Equipo de UV Lambda Perkin Elmer (Cuantificación Cromo Hexavalente)**



El barrido en el equipo de UV se realiza de 200 a 900 nm, apareciendo a 540 nm el pico característico del complejo Cr (VI)-DFC, al mismo tiempo el equipo proporcionó un valor de absorbancia.

#### **4.6.3 Cuantificación del Cromo trivalente**

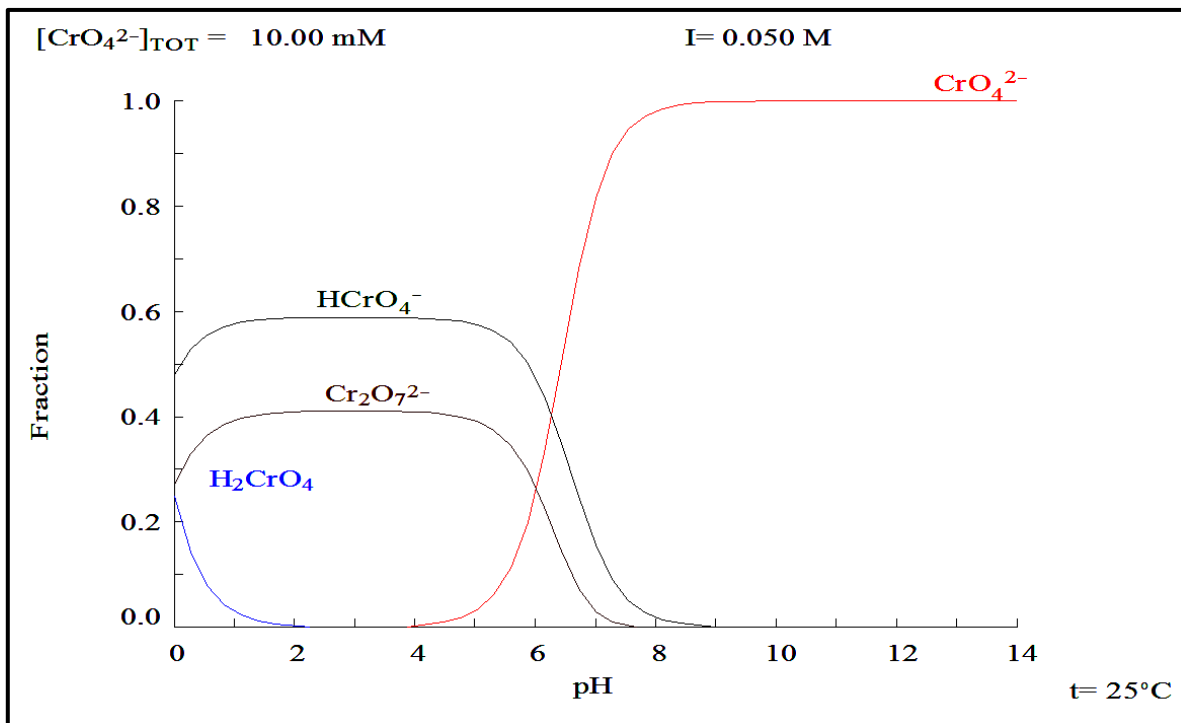
A las soluciones generadas del proceso de biofiltración, se recolectaron y se cuantificó la posible presencia de Cr (III) mediante el equipo de absorción atómica, que se encuentra en la Facultad de Química de la UAEM. Figura 4.14.



**Figura 4.14. Equipo de absorción atómica (cuantificación de Cromo (III) y Cromo Total)**

#### **4.7 Cuantificación de Cromo Hexavalente y Cromo Trivalente**

En cuanto se obtuvieron las 60 muestras de las concentraciones de Cr (VI) una vez ya filtradas, se procedió a la cuantificación del Cr VI y III. Como se mencionó previamente el pH fue el factor importante ya que mediante el diagrama de predominio de especies se constató que al pH que se trabajó todo el Cromo presente estuvo en un estado de oxidación de +<sup>6</sup>, esto se puede observar en la figura 4.15.



**Figura 4.15. Diagrama de predominio de especies del Cromo**

Fuente: Elaboración propia del autor, 2015

En esta Figura 4.15, se aprecia que las especies presentes del Cromo al pH 4,  $[\text{HCrO}_4]^{-1}$ ,  $[\text{Cr}_2\text{O}_7]^{-2}$  y  $\text{H}_2\text{CrO}_4$ , se analizó el estado de oxidación de cada uno de los elementos que se señalan en cada formula química y se constató que el Cromo tiene un estado de oxidación de seis. Con lo cual se aseguró que el Cromo presentara la valencia acorde con la propuesta de este trabajo de investigación.

Posteriormente se cuantificó dicho Cromo, para esto se utilizó el equipo de espectrofotometría de UV para cuantificar al Cromo Hexavalente y adsorción atómica para el trivalente, como se mencionó anteriormente. Los resultados de estas mediciones se muestran en las tablas de la 4.1 a la 4.5.

**Tabla 4.1. Resultados de la concentración 0.05 mgL<sup>-1</sup>**

|  | Tiempo (Minutos) |        |        |        |                                  |
|--|------------------|--------|--------|--------|----------------------------------|
|  | 30               | 60     | 90     | 120    |                                  |
| <b>Concentración 0.05 (mgL<sup>-1</sup>)</b> | 0.04             | 0.032  | 0.0251 | 0.019  | <b>Cr (VI) mgL<sup>-1</sup></b>  |
|  | 0.0097           | 0.0177 | 0.0247 | 0.028  | <b>Cr (III) mgL<sup>-1</sup></b> |
| <b>Suma parcial</b>                          | 0.0497           | 0.0497 | 0.0498 | 0.0470 |                                  |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 4.2. Resultados de la concentración 0.1 mgL<sup>-1</sup>**

|   | Tiempo (Minutos) |        |        |        |                                  |
|---|------------------|--------|--------|--------|----------------------------------|
|   | 30               | 60     | 90     | 120    |                                  |
| <b>Concentración 0.1 (mgL<sup>-1</sup>)</b> | 0.081            | 0.066  | 0.0515 | 0.04   | <b>Cr (VI) mgL<sup>-1</sup></b>  |
|   | 0.0186           | 0.03   | 0.048  | 0.057  | <b>Cr (III) mgL<sup>-1</sup></b> |
| <b>Suma parcial</b>                         | 0.0996           | 0.0960 | 0.0995 | 0.0970 |                                  |

Fuente: Elaboración propia, 2015

Como se puede apreciar en las tablas 4.1- 4.5 el comportamiento es igual en cuanto a la concentración de los iones de Cromo tanto hexavalente como trivalente, es decir la suma de ambas concentraciones es casi igual a la concentración inicial con la cual se trabajó.

**Tabla 4.3. Resultados de la concentración 0.5 mgL<sup>-1</sup>**

|   | Tiempo (Minutos) |        |        |        |                                  |
|---|------------------|--------|--------|--------|----------------------------------|
|   | 30               | 60     | 90     | 120    |                                  |
| <b>Concentración 0.5 (mgL<sup>-1</sup>)</b> | 0.41             | 0.334  | 0.265  | 0.22   | <b>Cr (VI) mgL<sup>-1</sup></b>  |
|   | 0.086            | 0.164  | 0.233  | 0.277  | <b>Cr (III) mgL<sup>-1</sup></b> |
| <b>Suma parcial</b>                         | 0.4960           | 0.4980 | 0.4980 | 0.4970 |                                  |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 4.4. Resultados de la concentración 1.0 mgL<sup>-1</sup>**

|   | Tiempo (Minutos) |        |        |        |                                  |
|---|------------------|--------|--------|--------|----------------------------------|
|   | 30               | 60     | 90     | 120    |                                  |
| <b>Concentración<br/>1.0 (mgL<sup>-1</sup>)</b> | 0.83             | 0.67   | 0.535  | 0.444  | <b>Cr (VI) mgL<sup>-1</sup></b>  |
|   | 0.168            | 0.327  | 0.464  | 0.553  | <b>Cr (III) mgL<sup>-1</sup></b> |
| <b>Suma parcial</b>                             | 0.9980           | 0.9970 | 0.9990 | 0.9970 |                                  |

Fuente: Elaboración propia, 2015

**Tabla 4.5. Resultados de la concentración 1.5 mg L<sup>-1</sup>**

|   | Tiempo (Minutos) |        |        |        |                                  |
|---|------------------|--------|--------|--------|----------------------------------|
|   | 30               | 60     | 90     | 120    |                                  |
| <b>Concentración<br/>1.5 (mgL<sup>-1</sup>)</b> | 1.245            | 1.01   | 0.801  | 0.675  | <b>Cr (VI) mgL<sup>-1</sup></b>  |
|   | 0.253            | 0.486  | 0.697  | 0.824  | <b>Cr (III) mgL<sup>-1</sup></b> |
| <b>Suma parcial</b>                             | 1.4980           | 1.4960 | 1.4980 | 1.4990 |                                  |

Fuente: Elaboración propia, 2015

Después de que se obtuvieron las cuantificaciones del Cromo hexavalente, trivalente y total, a través de las técnicas anteriores se llevó a cabo la realización de las gráficas correspondientes en donde se mostrara el comportamiento de reducción del Cromo hexavalente y de la generación del Cromo trivalente durante el proceso de filtrado, esto se puede observar en las figuras 4.16 - 4.20.

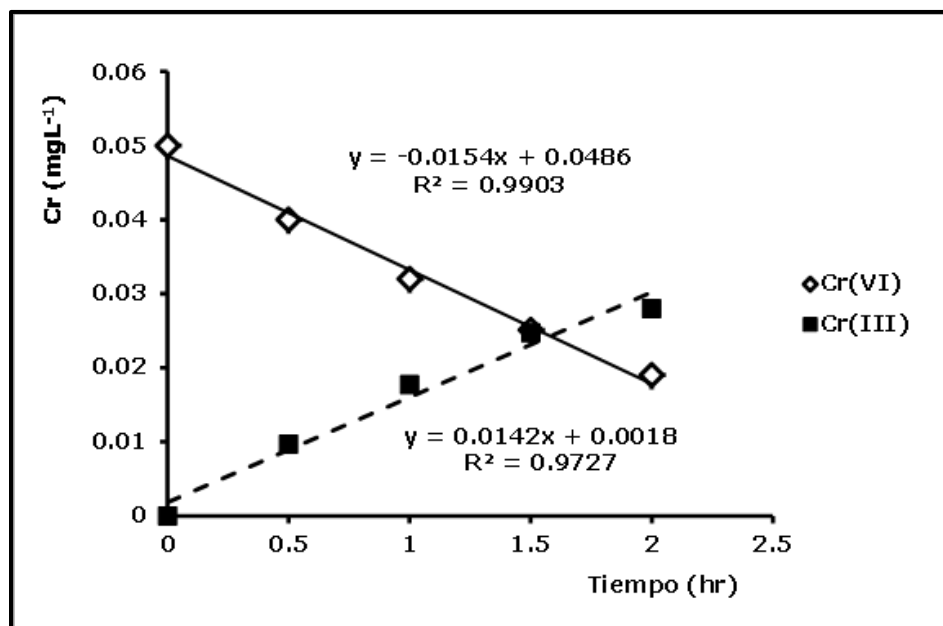


Figura 4.16. Gráfica de reducción de Cr<sup>6+</sup> (concentración 0.05 mgL<sup>-1</sup>)  
Fuente: Elaboración propia, 2015

En las figuras de la 4.16 a la 4.20 se muestran los perfiles de reducción de la solución acuosa del Cromo hexavalente por el biomaterial durante todo el proceso de filtrado. Como se puede apreciar, conforme pasa el tiempo de filtración la concentración inicial del Cromo hexavalente disminuye. En un inicio se diluyó que este ión era adsorbido por el biomaterial debido a las cuantificaciones realizadas empleando la técnica de espectrofotometría de UV. Pero al corroborar los resultados de cuantificación con la técnica de absorción atómica se pudo constatar que el Cromo no es retenido por el biomaterial, sino que sufre una reducción química. Si se analizan las gráficas de ambos iones, estas son complementarias, es decir si se suman las concentraciones de esta manera:

$$[\text{Cr (VI)}] + [\text{Cr (III)}] = [\text{Co}] \text{ inicial}$$

Por lo cual la suma de cada uno de los valores de las concentraciones para los dos iones del Cromo señalados, deben de coincidir con la concentración inicial del Cromo con la cual se realizó el proceso de filtración. Se puede señalar en todos los procesos de filtración el Cromo trivalente se va generando en función del tiempo. Esto anterior se puede constatar en los valores encontrados para el Cr (VI) iniciando en una concentración de 0.05 mgL<sup>-1</sup>, para después de dos horas la

cuantificación arrojó un valor de  $0.019 \text{ mgL}^{-1}$ , esto indica un descenso en la concentración.

Para el Cr (III) el proceso fue todo lo contrario, la concentración en solución aumentó progresivamente a medida que se incrementó el tiempo de contacto, hasta alcanzar un valor de  $0.028 \text{ mgL}^{-1}$  al final del experimento.

Este comportamiento no fue exclusivo para la solución sintética de Cr (VI) de  $0.05 \text{ mgL}^{-1}$ , sino que este fue repetitivo para todas las soluciones que se emplearon en la filtración, esto se aprecia claramente en las Figuras 4.16 – 4.20.

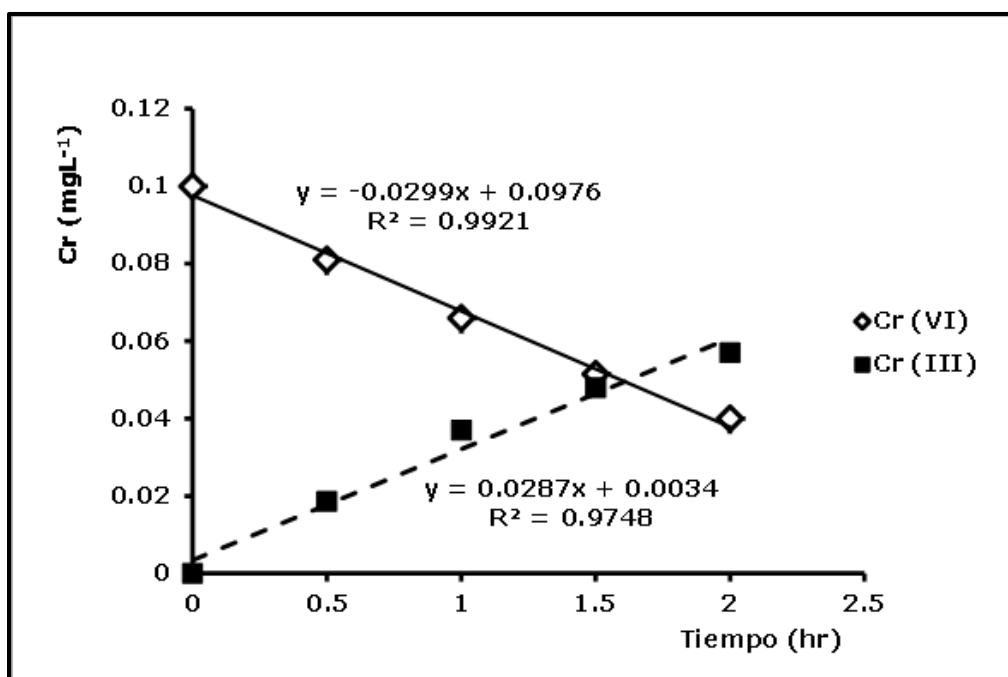


Figura 4.17. Gráfica de reducción de Cr <sup>6+</sup> (Concentración  $0.1 \text{ mgL}^{-1}$ )

Fuente: Elaboración propia, 2015

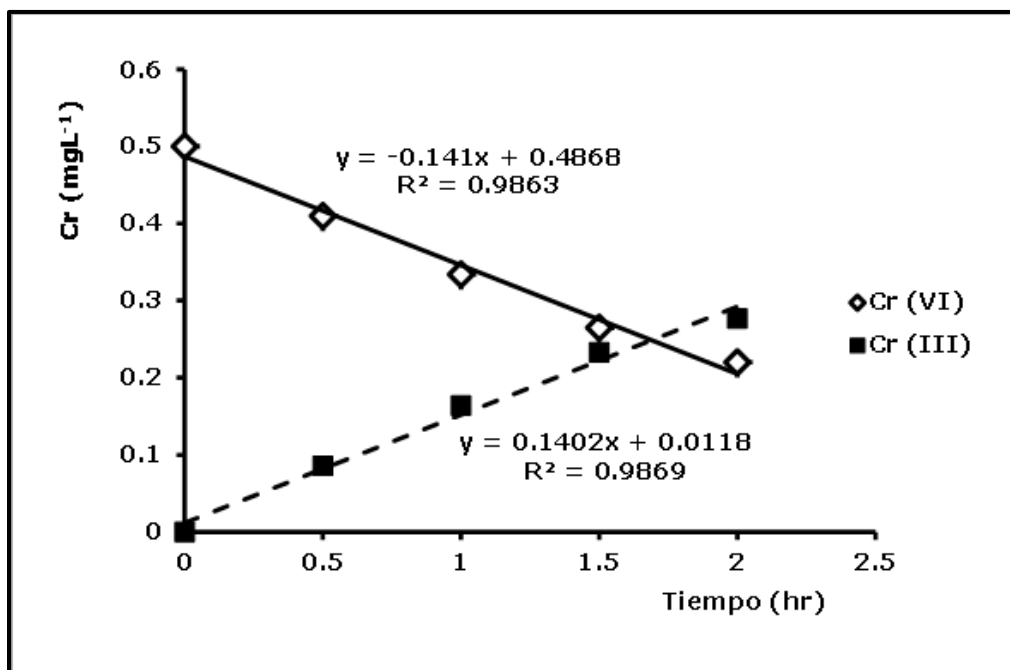


Figura 4.18. Gráfica de reducción de  $\text{Cr}^{6+}$  (Concentración  $0.5 \text{ mgL}^{-1}$ )  
Fuente: Elaboración propia, 2015

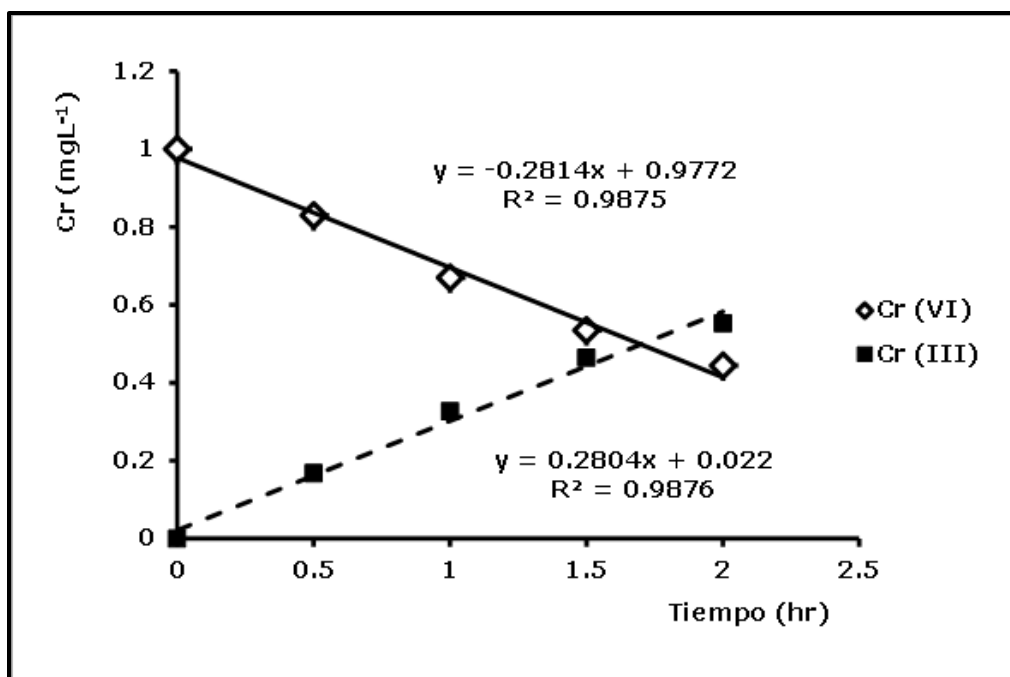
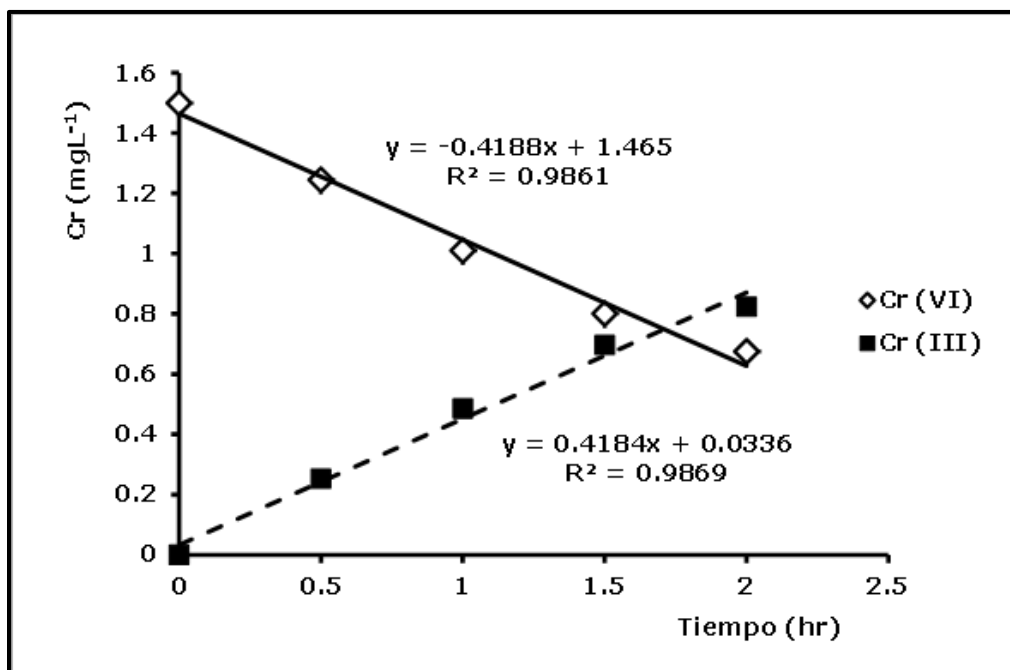


Figura 4.19. Gráfica de reducción de  $\text{Cr}^{6+}$  (Concentración  $1.0 \text{ mgL}^{-1}$ )  
Fuente: Elaboración propia, 2015



**Figura 4.20. Gráfica de reducción de Cr<sup>6+</sup> (Concentración 1.5 mgL<sup>-1</sup>)**  
 Fuente: Elaboración propia, 2015

De los resultados anteriores se deduce que el olote de maíz posee en su estructura molecular, compuestos químicos capaces de reducir el altamente tóxico Cr (VI), al menos tóxico Cr (III). El Cr (VI) es reducido a Cr (III) en solución acuosa cuando se pone en contacto con grupos donadores de electrones que están presentes en los materiales biológicos, es decir con grupos funcionales que tienen un potencial de óxido-reducción inferior al del Cromo (1.3 V, en condiciones estándar) (Park, et al., 2008).

#### 4.8 Mecanismo de Reducción

Como se puede constatar en todos los procesos se llevó a cabo una reducción química del Cromo Hexavalente a un estado de oxidación 3+, y no un proceso de adsorción como el que se había planteado en un principio (González, et al., 2001).



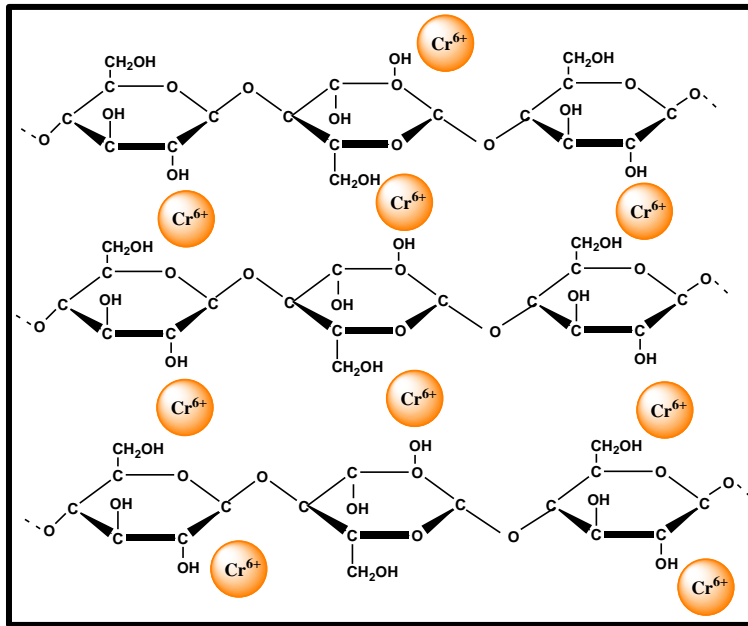
#### **4.8.1 Mecanismo de reducción de Cr<sup>6+</sup>**

En este caso en particular el Cromo hexavalente sufre una reducción química, la cual consiste en que el ion Cr<sup>6+</sup> acepta tres electrones con lo cual su estado de oxidación cambia a 3<sup>+</sup>. Para que suceda esto se necesita un agente reductor que en este caso son los grupos funcionales del biomaterial, que están contenidos o conforman estructuralmente a la celulosa y hemicelulosa. En los siguientes puntos se analiza la propuesta de reducción para el Cr<sup>+6</sup> al ponerse en contacto con dichos compuestos orgánicos.

#### **4.8.2 Reducción de Cr<sup>6+</sup> en la celulosa**

Las propiedades químicas absorbentes del biomaterial son las que determinan los mecanismos de adsorción o reducción química. Entre los mecanismos más frecuentes que se presentan para metales son el intercambio iónico, interacción electrostática y la quelación, entre otros (Deng & Peng, 2005).

Para este caso el Cromo hexavalente se adicionó en forma de K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, al estar en un pH ácido se favorece la presencia de este ion. Posteriormente al llevarse a cabo la pseudo filtración mediante el biomaterial, los iones de Cromo inmediatamente se acercan a los grupos funcionales de la celulosa (en este caso específico los grupos hidroxilo), que son grupos que poseen electrones libres, capaces de generar la reducción química citada en el párrafo anterior. Esto se puede apreciar en la figura 4.21. Posteriormente la pérdida de protones de los grupos OH propician la formación de una sal de potasio, hay que recordar que el potasio proviene del dicromato que se empleó para los contactos.

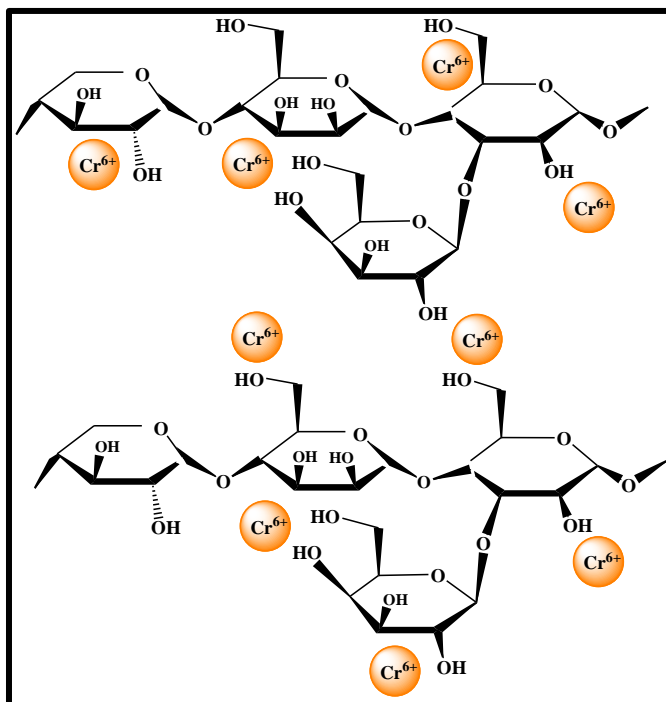


**Figura 4.21 Reducción de Cr<sup>6+</sup> en la celulosa**

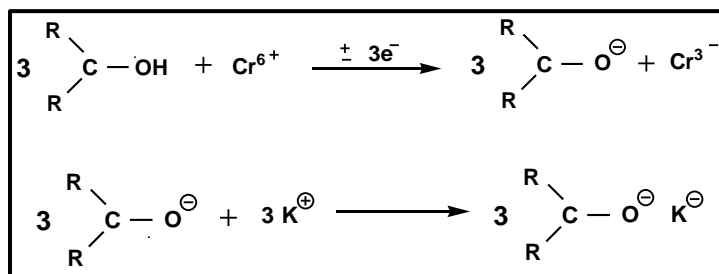
Fuente: Elaboración propia, 2015

#### **4.8.3 Mecanismo de reducción de Cr<sup>6+</sup> en la hemicelulosa**

De igual manera para la hemicelulosa, para que el Cr<sup>6+</sup> sufriera una reducción al estar en contacto con la hemicelulosa (la estructura se encuentra presente en el biomaterial), al entrar en contacto la solución acuosa del Cr<sup>6+</sup> a este le cede un protón lo cual provoca una reducción y por ende un cambio de oxidación a Cr<sup>3+</sup> y se genera la sal del potasio, lo cual impide que exista una adsorción química (Boduu, et al., 2003). En la figura 4.22 se muestra el acercamiento del analito con la hemicelulosa y en la figura 4.23 la propuesta de reducción química por los grupos OH que están presentes tanto en la celulosa como hemicelulosa.



**Figura 4.22 Mecanismo de reducción de Cr<sup>6+</sup> en la hemicelulosa**  
Fuente: Elaboración propia, 2015

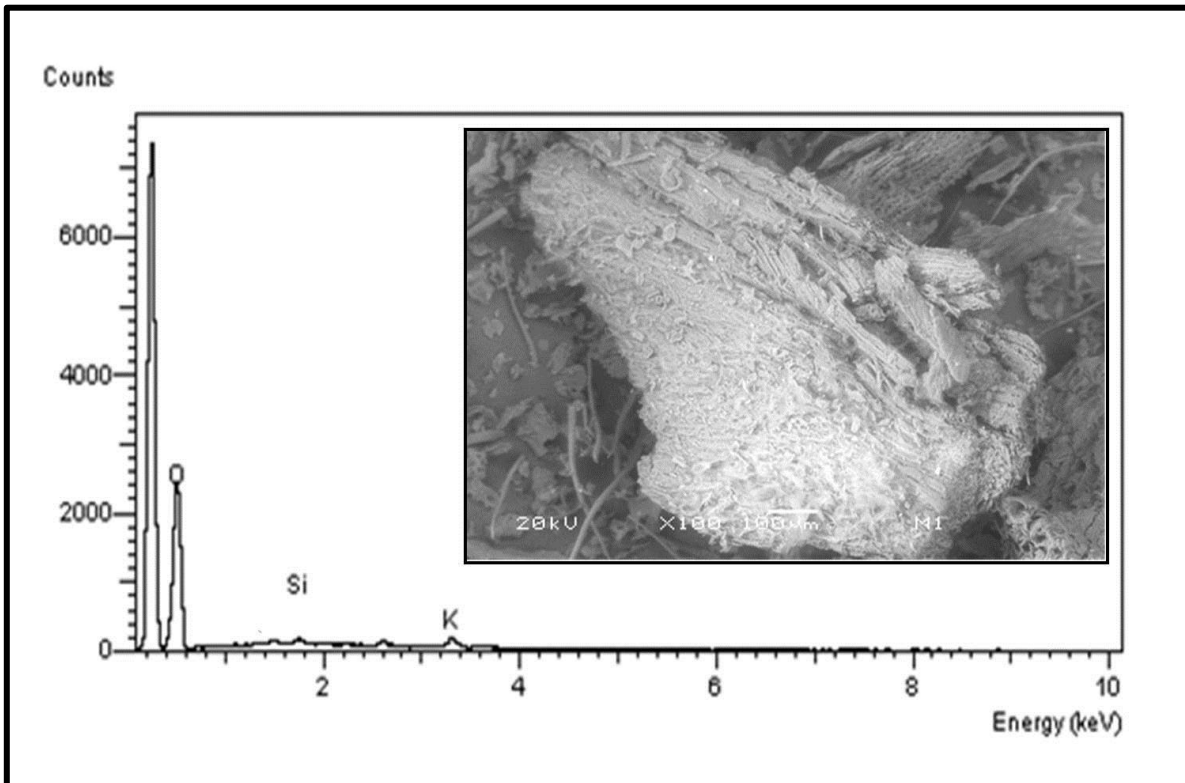


**Figura 4.23 Propuesta de mecanismo de reducción de Cr<sup>6+</sup>**  
Fuente: Elaboración propia, 2015

Como puede apreciarse esta generación de sales de potasio, provocan que el Cromo 3<sup>+</sup> sea adsorbido, y este sea liberado nuevamente a la solución acuosa, por lo cual las concentraciones de este analito (cuantificadas vía absorción atómica) difieran muy poco con las concentraciones iniciales de Cromo 6<sup>+</sup>. Esto se constató en las cuantificaciones señaladas en las Tablas 4.1-4.5.

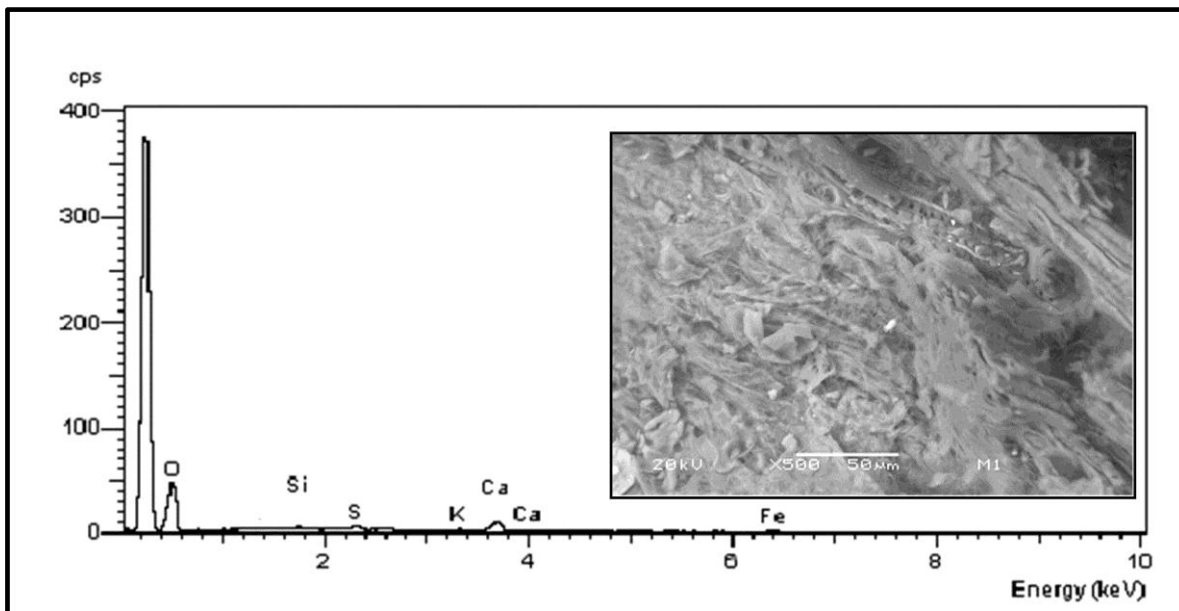
#### 4.9 Microscopía Electrónica de Barrido y Microanálisis (MEB)

Con la finalidad de observar la superficie del biomaterial, se realizó su caracterización del biomaterial mediante la técnica de MEB, con la finalidad de comparar el comportamiento del experimento antes y después de la filtración, los resultados se muestran en las figuras 4.24 y 4.25.



**Figura 24. MEB del biomaterial (olote) antes del proceso de filtración**

Como se puede apreciar en la Figura 24 el biomaterial está constituido por los elementos de Carbono, Oxígeno, Silicio y Potasio. Se recuerda que esta técnica es puntual, quiere decir que la muestra que fue introducida al microscopio, solamente un punto en su superficie puede ser analizada en el momento del funcionamiento del microscopio. Esto significa que no toda la composición del biomaterial tiene estos elementos. Por otro lado se muestra la superficie del biomaterial en el recuadro superior derecho, donde se puede observar que la forma es un tanto rugosa, en forma de cilindros. Se recuerda que este análisis correspondió al biomaterial antes de realizar el proceso de filtración.



**Figura 25. MEB del biomaterial (olote) después del proceso de filtración**

En la figura 25 se muestra la composición del biomaterial después de proceso de filtración, se encontraron los mismos elementos originales que fueron el Carbono, Oxígeno, Silicio y Potasio. También se detectaron los elementos da Azufre, Hierro y Calcio, en los dos primeros se dilucida que pudieron estar presentes en los materiales de vidrio con los cuales se estuvo manipulando las soluciones sintéticas de Cromo. El Calcio si puede estar presente como constituyente natural del biomaterial. No obstante con estos resultados se esperaba encontrar indicios del elemento Cromo, el cual no es detectado en este análisis, este comportamiento se repitió en todas las muestras que se enviaron para su microanálisis, con esto se corrobora que en el biomaterial no se llevó a cabo una adsorción, ya que de haberse llevado a cabo, dicho analito (Cr) estaría presente. De igual manera se presenta en el recuadro superior derecho la superficie del biomaterial después del proceso, de igual manera presenta una superficie rugosa heterogénea, formando pequeñas hojas.

Resulta importante señalar que no se pudo realizar el cálculo de isoterma, ya que en las tablas de resultados se puede apreciar que el  $\text{Cr}^{6+}$  no fue adsorbido por el biomaterial.

Por otro lado en la figura 25 se puede observar que no existe la presencia de  $\text{Cr}^{6+}$  en la estructura del biomaterial olote por lo tanto se puede concluir que no existe una adsorción de este metal.

# **Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones**

A partir del desarrollo de esta investigación se plantean las siguientes conclusiones y recomendaciones.

## 5.1 Conclusiones

- Si bien existen técnicas en las que se emplea el *Zea Mays*, en la bioadsorción de  $\text{Cr}^{6+}$ , en todas ellas se usaba el biomaterial químicamente modificado (Carreño, 2014), (García & Colín, 2010), (Primera, et al., 2011), en esta investigación se comprobó que el olote de maíz empleado en su forma natural, si bien no lleva a cabo los procesos de bioadsorción, efectúa procesos de reducción de  $\text{Cr}^{6+}$  a Cromo  $^{3+}$
- Las propiedades químicas del biomaterial permitieron la reducción de Cromo hexavalente a Cromo trivalente a través de un cambio de oxidación y no por adsorción como se pensaba.
- El uso de este tipo de biomateriales, pueden ser empleados como alternativa para atacar la problemática de contaminación del agua a causa del  $\text{Cr}^{6+}$  el cual es sumamente tóxico para el ser humano.
- El olote de maíz presenta alta capacidad para la reducción de Cromo Hexavalente a Cromo Trivalente.
- El proceso de reducción del Cromo Hexavalente ocurre continuamente durante toda la etapa de experimentación (2 horas). Esto se corroboró en el análisis de MEB del biomaterial después del proceso de filtración.
- En cuanto existe el contacto de la solución acuosa con el biomaterial se aprecia que la concentración de  $\text{Cr}^{6+}$  disminuye, mientras que la concentración de  $\text{Cr}^{3+}$  aumenta.
- Se observa que el mecanismo de reducción del  $\text{Cr}^{6+}$  depende en gran medida al tipo de biomaterial que se esté empleando y al tiempo de contacto que tenga este metal.
- El modelo de la filtración biológica de dos pasos con reúso del filtrado, favoreció adecuadamente el proceso de reducción de Cromo Hexavalente.



- Los grupos funcionales existentes en la celulosa y hemicelulosa son de suma relevancia para que esta reducción química pudiera llevarse a cabo, esta reducción se lleva a cabo en función del tiempo.
- No se pudo realizar el cálculo de isotermas, ya que en las tablas de resultados se puede apreciar que el  $\text{Cr}^{6+}$  no fue adsorbido por el biomaterial.
- No se cumple con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 en donde se establecen los límites permisibles del Cromo total para el agua, el cual es de 0.05 mg/L, ya que éste no es absorbido por el biomaterial, pero si se logra reducir la toxicidad de este metal ya que este es altamente cancerígeno.
- El presente trabajo de investigación ofrece una propuesta útil en el caso de que se desee implementar un sistema de biofiltros en casas habitación o en cuerpos de agua con la finalidad de abatir el  $\text{Cr}^{6+}$  que tengan presentes.

Los procesos de biofiltración, presentan normalmente alta eficiencia para la remoción y adsorción de metales pesados presentes en el agua, por lo que este tipo de investigaciones son útiles y se constituyen en una alternativa que presenta beneficios económicos y ambientales.

## 5.2 Recomendaciones

- Continuar con este tipo de investigaciones, para que no solo pueda ser tratado el Cromo hexavalente, sino también otros metales que de igual manera presentan daños a la salud humana y están presentes en el agua.
- El *Zea Mays* tiene que ser tratado químicamente para que pueda adsorber el  $\text{Cr}^{6+}$  (Carreño, 2014), (García & Colín, 2010) y (Primera, et al., 2011). Ya que con este tratamiento la superficie en su estructura cambiaría totalmente favoreciendo la adsorción del Cromo.
- Se propone que con la finalidad de favorecer la adsorción del  $\text{Cr}^{6+}$ , el biofiltro de dos etapas de contacto, se lleve a cabo, una con el biomaterial natural y la otra con el biomaterial tratado químicamente o viceversa.

- Darle una mayor prioridad a estas investigaciones dentro de la Facultad de Planeación Urbana y Regional.

## Bibliografía

Acosta, I; Sandoval, P; Bautista, D; Hernández, N; Cárdenas, J; Martínez, V. (2012) "Bioadsorción de Cromo (VI) por la cáscara de mamey (Mammea Americana L.)".

Agenda del Agua 2030 (2011) [en línea] Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx> [consultado en 2015].

Aguilar F; Espino, S; León, I; Rivera, M. (2006) "Hexavalent chromium removal in Vitro and from industrial wastes".

Albert, L. (2010) "Cromo". México: Reverté.

Ali Omar, Al-Khashman (2008) "Chemical characteristics of rainwater collected at a western site of Jordan" Science Direct.

Análisis de agua [en línea] Disponible en: [http://water.metrohm.com/pdf/Prosp\\_Wasseranalytik\\_ES\\_web.pdf](http://water.metrohm.com/pdf/Prosp_Wasseranalytik_ES_web.pdf) (2013) [Consultado en 2014].

Anaya, M. (2011) "Captación del agua de lluvia solución caída del cielo" México, bba (biblioteca básica de agricultura).

Annan, K. (2010) "Reglamento de la calidad del agua para consumo humano". [en línea] Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/e/cdcagua/normas/lac/16.PER/02.reglamento.pdf> [Consultado en 2012].

Baéz, J. (2010) "Captación de agua de lluvia" México, Reverté.

Biofiltración (2010) [en línea] Disponible en: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/396/biofiltra.html> [Consultado en 2012].

Biofiltración innovadora para el tratamiento de aguas residuales provenientes de las industrias y de comunidades (2009), [en línea] Disponible en: [http://www.aquabiotec.com/files/uploads/pdf/AQUABIOdom\\_Biofiltracion%20innovadora%20para%20el%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales.pdf](http://www.aquabiotec.com/files/uploads/pdf/AQUABIOdom_Biofiltracion%20innovadora%20para%20el%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales.pdf) [Consultado en 2012].

Biofiltro, una alternativa para la reutilización de aguas residuales (2009) [en línea] Disponible en: <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR35535.pdf> [Consultado en 2012].

Biofiltro. Estudio y propuesta (2010) [en línea] Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/10427/1/Memoria.pdf> [Consultado en 2012].

Biofiltros domiciliarios. Filtros biológicos para la remoción de nutrientes de aguas grises (2011) [en línea] Disponible en: <http://www.ideassonline.org/public/pdf/BrochureBiofiltro.pdf> [Consultado en 2013].

Boduu, V; Abburi, K; Talbott; Smith, E. (2005) "Heavy metal reduction" El Sevier.

Bolívar, N; Gurrola, K; Moorillón M; Hernández, F; Enríquez, G; García, B. (2007) "Reducción de Cromo Hexavalente contenido en aguas residuales mediante un tratamiento biológico".

Brikké, F. (2006). Water and sanitation program, [en línea] Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd32/biofil.pdf> [Consultado en 2013].

Calixto, R. (1999) "Ecología y medio ambiente". México.

Campos, E; Barrera, C; Ureña, F; Roa, G. (2008) "Remoción de Cr (VI), Cr (III) y Fe(III) generados electroquímicamente en soluciones acuosas, por medio de ectodermis de opuntia".

Captación de agua de lluvia como alternativa para afrontar la escasez del recurso (2010) [en línea] Disponible en: [http://licenciatura.iconos.edu.mx/k\\_angi/nueva/tienda/biblioteca/Manual%20Captacion%20de%20de%20lluvia.pdf](http://licenciatura.iconos.edu.mx/k_angi/nueva/tienda/biblioteca/Manual%20Captacion%20de%20de%20lluvia.pdf) [Consultado en 2013].

Carabias, J. (2005) "Agua, medio ambiente y sociedad: hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México". México, UNAM.

Cárdenas, J; Acosta, I. (2010) "Remoción de Cromo Hexavalente por el Hongo Paecilomyces sp. Aislado del Medio Ambiente".

Chang, Z (2004) "Sistemas de captación de agua de lluvia" España.

Ciencia y desarrollo (2008) [en línea] Disponible en: <http://www.cyd.conacyt.gob.mx/215/Articulos/Cromado/Cromado2.html> [consultado en 2015].

Contaminación del Agua, protección civil (2011) [en línea] Disponible en: [http://qacontent.edomex.gob.mx/idc/groups/public/documents/edomex\\_archivo/dgproteccion\\_civil\\_pdf\\_cont.pdf](http://qacontent.edomex.gob.mx/idc/groups/public/documents/edomex_archivo/dgproteccion_civil_pdf_cont.pdf) [consultado en 2015].

Córdoba, J; Salcedo, E; Rodríguez, R; Zamora, J; Manríquez, R; Contreras, H; Robledo, J; Delgado, E. (2013) "Caracterización y valoración química del olote: degradación hidrotérmica bajo condiciones subcríticas".

Cromo [en línea] Disponible en: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cr.htm#ixzz3YoEdH0CW> [Consultado en 2015].

Diseño de un sistema de biofiltración para la remoción de estireno (2005) [en línea] Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/1492/149217448001.pdf> [Consultado en 2013].

Durán, P. (2010) “Congreso nacional del medio ambiente” [en línea] Disponible en: <http://www.conama10.es/conama10/download/files/CT%202010/41008.pdf> [Consultado en 2014].

Echarri, Luis (1998) “Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente”. México. Ed. Teide.

Eggs, N; Salvarezza, S; Azario, R; Fernández, N; García, M. (2011) “Adsorción de Cromo hexavalente en la cáscara de arroz modificada químicamente”.

Evaluación de los costes de construcción y operación de un biofiltro (2007) [en línea] Disponible en: [http://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2007/hdl\\_2072\\_5404/PFCFernandezSe.pdf](http://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2007/hdl_2072_5404/PFCFernandezSe.pdf) [Consultado en 2013].

Evans, V. (2007) “Calidad y uso del agua de lluvia” Colombia.

FAOSTAT: Producción mundial de maíz (2012) [en línea] Disponible en: <http://http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor> [Consultado en 2015].

Farooq, U; Kozinski J; Khan, M; Athar, M. (2010) “Biosorption of heavy metal ions using wheat based biosorbents – A review of the recent literature” El Sevier.

Francois, G. (2005) “Distribución de agua potable y colecta de desagües y de agua de lluvia”. Canadá: AndréeLaprise.

Frank, A. (2009) “Uso sustentable del agua de lluvia” España, Pearson.

Funcionamiento y aplicación de biofiltros (2010) [en línea] Disponible en: <http://www.biofiltro.cl/aplicaciones.html> [Consultado en 2013].

Gallardo, J. y Moreno, G (2009) “Modificación de la composición química del agua de lluvia” México.

García, G; Colín, A. 82010) “Biosorption of lead by maize (Zea mays) stalk sponge” El Sevier.

Gobierno de Chile, (2011). Fundación Chile, biofiltro, [en línea] Diponible en: [http://www.sinia.cl/1292/articles-49990\\_07.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_07.pdf) [Consultado en 2013].

Goyal, P; Srivastava, S. (2009) “Characterization of novel Zea mays based biomaterial designed for toxic metals biosorption” El Sevier.

Gray, F. (1996) “Calidad del agua potable problemas y soluciones”. España, editorial acribia, S.A.

H. Ayuntamiento de Lerma (2013) "Plan municipal de desarrollo urbano de Lerma, Estado de México" [en línea] Disponible en: <http://www.plan/municipal/desarrollo/lerma.com> [Consultado en 2015].

Henry, J; Helnke, G. (1999) "Ingeniería ambiental ". México, editorial assistant.

Howard, L. (1998) "Introducción a la Química". Nueva York, editado por: John Wiley.

Jiménez, B. (2001) "La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada". México: Limusa.

K. Bratieres, T.D. Fletcher (2008) "Nutrient and sediment removal by stormwater biofilters:A large-scale design optimisation study" Science Direct.

Kai Bester, Daniel Scha (2008) "Activated soil filters (bio filters) for the elimination of xenobiotics (micro-pollutants) from storm- and waste waters".

Kai Bester, Stefan Banzhaf (2011) "Activated soil filters for removal of biocides from contaminated run-off and waste-waters" Science Direct.

La Guía de Química [en línea] Disponible en: <http://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/#ixzz3YopUIYZd> [Consultado en 2015].

Li, S; Li, H; Liang X; Chen Y; Wang, S; Wang, F. (2009) "Phosphorus removal of rural wastewater by the paddy-rice-wetland system in Tai Lake Basin" Science Direct.

Martínez, R; Bautista, D; Sandoval, P; Cárdenas J; Martínez, V; Acosta, I. (2009) "Remoción y reducción de Cromo VI en solución por la cáscara de lichee (litchi chinensis soon)".

Métodos para purificar el agua (2011). [en línea] Disponible en: [http://www.profeco.gob.mx/revista/publicaciones/adelantos\\_04/purificar\\_agua\\_mzo04.pdf](http://www.profeco.gob.mx/revista/publicaciones/adelantos_04/purificar_agua_mzo04.pdf) [Consultado en 2015].

Norma Mexicana NMX-AA-044-SCFI-2014 [en línea] Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NMX-AA-044-SCFI-2014.pdf> [Consultado en 2014].

Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996 [en línea] Disponible en: [http://www.sedema.df.gob.mx/sedema/images/archivos/sedema/leyes\\_reglamentos/normas/federales/NOM-002-SEMARNAT-1996.pdf](http://www.sedema.df.gob.mx/sedema/images/archivos/sedema/leyes_reglamentos/normas/federales/NOM-002-SEMARNAT-1996.pdf) [Consultado en 2015].

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 [en línea] Disponible en: <http://www.edomex.gob.mx/ecal/doc/pdf/127-ssa1.pdf> [Consultado en 2013].

Plan de desarrollo del Estado de México (2011) [en línea] Disponible en: <http://www.edomexico.gob.mx> [consultado en 2015].

Plan Nacional de Desarrollo (2013) [en línea] Disponible en:  
<http://www.plan/nacional/méxico.com.mx> [consultado en 2015].

Primera, O; Colpas, F; Meza, E; Fernández, R. (2011) “Carbones activados a partir de bagazo de caña de azúcar y zuro de maíz para la adsorción de Cadmio y Plomo”

Programa de agua y saneamiento región américa latina y el caribe (2009) Biofiltro: Una opción sostenible para el tratamiento de aguas residuales.

Química (2000). La guía de química, conceptos básicos. [en línea] Disponible en:  
<http://quimica.laguia2000.com/general/conceptos/básicos> [Consultado en 2015].

Recursos hídricos y Contaminación del agua (2009) [en línea] Disponible en:  
[http://www.bioygeo.info/pdf/06\\_Recursos\\_hidricos\\_y\\_contaminacion.pdf](http://www.bioygeo.info/pdf/06_Recursos_hidricos_y_contaminacion.pdf) [Consultado en 2013].

Redalyc. “Aprovechamiento del agua lluvia para riego y lavado de zonas duras y fachadas en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana” (Bogotá, 2006).

Redalyc. “Velocidades de sedimentación en aguas pluviales de Cd. Juárez, Chihuahua, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas” (2007).

Reglamento de los requisitos oficiales físicos, químicos y bacteriológicos que deben reunir las aguas de bebida para ser consideradas potables (2000) [en línea] Disponible en:  
[http://www.sunass.gob.pe/doc/normas%20legales/legisla%20web\(cambio\)/normas/relacionadas/1946.pdf](http://www.sunass.gob.pe/doc/normas%20legales/legisla%20web(cambio)/normas/relacionadas/1946.pdf) [Consultado en 2014].

Remoción de Zinc y Cobre [en línea] Disponible en:  
<https://prezi.com/uiqyfrqjd1rm/remocion-de-zinc-y-cobre-con-zea-mays-modificado-con-naoh-e/> [consultado en 2015].

Resultados del monitoreo piloto de agua de la CARL (2012) [en línea] Disponible en:  
<http://www.semagem.gob.mx> [consultado en 2015].

Salas M; González T (2009) “Captación de agua de lluvia “In Situ” una alternativa para complementar la demanda en el Semi-Desierto Zacatecano”.

Semarnat (2010) “Sistema de captación, almacenamiento y purificación del agua” [en línea] Disponible en:  
<http://www.conafor.gob.mx/BIBLIOTECA/captacion%20de%20agua%20de%20lluvia%20y%20biofiltro.pdf> [Consultado en 2014].

SEMARNAT, Indicadores Básicos del Desempeño Ambiental de México (2012) [en línea] Disponible en:  
[http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores13\\_cd/conjuntob/00\\_conjunto/introduccion.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores13_cd/conjuntob/00_conjunto/introduccion.html) [Consultado en 2013].

Serie autodidáctica de medición de la calidad del agua [en línea] Disponible en:  
[http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd67/fundamentos\\_tecnicos.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd67/fundamentos_tecnicos.pdf) [Consultado en 2014].

Simpson, D. (2008) "Biofilm processes in biologically active carbon water purification" Science Direct.

Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales para Albergues en Zonas Rurales (2008) [en línea] Disponible en: [http://www.mincetur.gob.pe/Turismo/Otros/cultur/pdfs\\_documentos\\_Cultur/Gestion\\_Ambiental/Aguas\\_servidas.pdf](http://www.mincetur.gob.pe/Turismo/Otros/cultur/pdfs_documentos_Cultur/Gestion_Ambiental/Aguas_servidas.pdf) [Consultado en 2014].

Sistemas de Recirculación y Tratamiento de agua (2007) [en línea] Disponible en: [http://www.minagri.gob.ar/SAGPyA/pesca/acuicultura/01=Cultivos/03Otros\\_Sistemas/\\_archivos/000003Sistemas%20de%20recirculaci%C3%B3n%20y%20tratamiento%20de%20agua.pdf](http://www.minagri.gob.ar/SAGPyA/pesca/acuicultura/01=Cultivos/03Otros_Sistemas/_archivos/000003Sistemas%20de%20recirculaci%C3%B3n%20y%20tratamiento%20de%20agua.pdf) [Consultado en 2014].

Stanley, E. (2007) "Introducción a la química ambiental". México: Reverté.

Tecnología de biofiltros (2008) [en línea] Disponible en: [http://www.sinia.cl/1292/articles-49990\\_07.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_07.pdf) [Consultado en 2013].

Tyler, G. (2010) "Ciencia ambiental: desarrollo sostenible un enfoque integral". México, CengageLearning Editores, S.A.

Valderrama, José (1998): "Información Tecnológica". Chile: Rosales.

Water Treatment Solutions (2009) [en línea] Disponible en: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cr.htm> [Consultado en 2015].

Xinwei Lu, Loretta Y. Li, *et al* (2011) "Chemical characteristics of spring rainwater of Xi'an city, NW China" Science Direct.