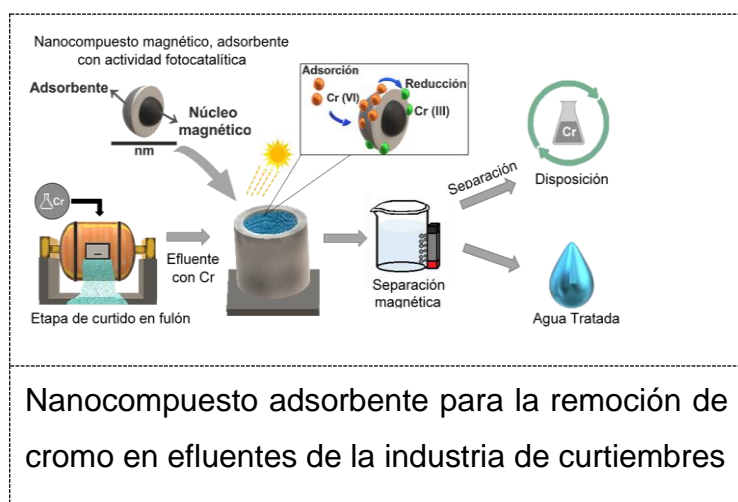


**Aproximación a la remediación de efluentes industriales provenientes de sector  
curtiembres en Bogotá a través de una solución nanotecnológica**

***Approach to the remediation of industrial effluents from the tanning sector in  
Bogotá through a nanotechnological solution***

**Graphical Abstract (GA)**



**Aproximación a la remediación de efluentes industriales provenientes de sector  
curtiembres en Bogotá a través de una solución nanotecnológica**

***Approach to the remediation of industrial effluents from the tanning sector in  
Bogotá through a nanotechnological solution***

***Diego Andrés Castiblanco Ramirez\****

*\* Programa de Bioquímica. Facultad de Ciencias. Universidad Antonio Nariño.*

*Dirigido por: Rolando Javier Rincón Ortiz*

**Resumen**

El sector de curtido de pieles es una de las actividades industriales más representativas en la economía colombiana, con una participación del 2,17% en el PIB manufacturero, agrupados en su mayoría en PYMES por medio de la exportación del cuero tipo *wet-blue* generando ingresos de 70 millones de dólares al año. Sin embargo, una explotación indebida de la actividad, así como prácticas manufactureras poco conscientes del impacto ambiental generado principalmente por el Cromo hexavalente, genera una preocupación tanto a los efectos ambientales como a los efectos nocivos para la salud de la población Bogotaná. El presente artículo establece mediante una revisión de literatura los tratamientos convencionales y futuros para la remoción de metales pesados tomando como modelo el cromo hexavalente, proponiendo un nanomaterial que solvante la problemática en las aguas residuales.

**Palabras clave:** curtiembres, cromo hexavalente, tratamiento, nanomaterial

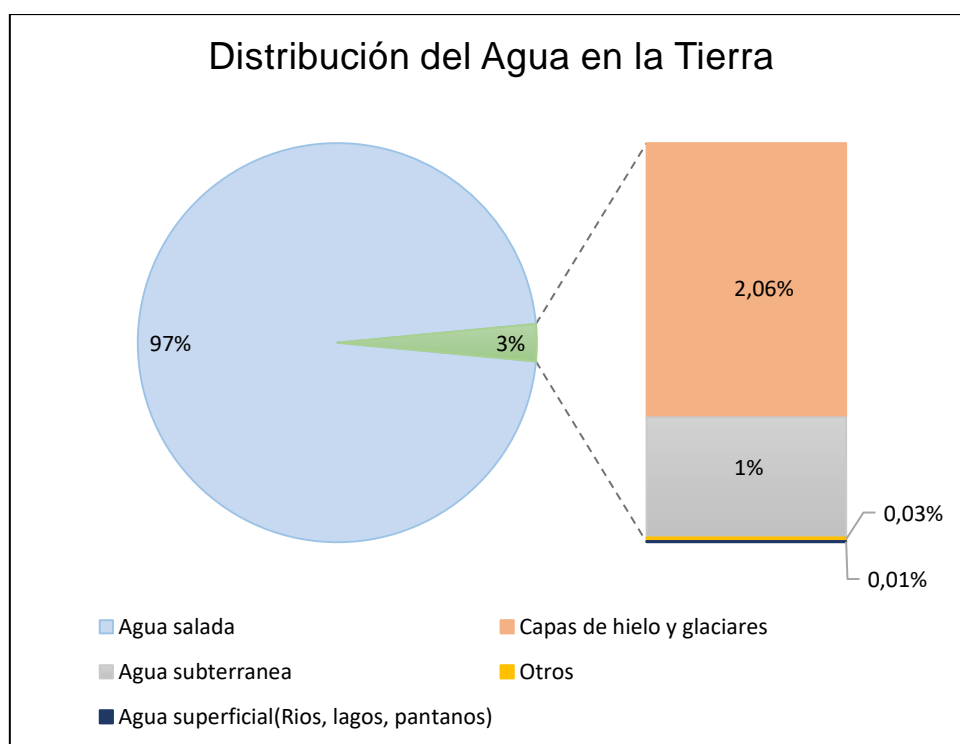
## **Abstract**

The leather tanning sector is one of the most representative industrial activities in the Colombian economy, with a share of 2.17% in the manufacturing GDP, mostly grouped into SMEs through the export of wet-blue type leather generating revenue of \$ 70 million a year. However, an undue exploitation of the activity, as well as manufacturing practices that are not very aware of the environmental impact generated mainly by hexavalent chromium, generates concern both for the environmental effects and for the harmful effects on the health of the population of Bogotaná. The present article establishes through a literature review the conventional and future treatments for the removal of heavy metals, taking hexavalent chromium as a model, proposing a nanomaterial that solves the problem in wastewater.

**Key words:** tanneries, hexavalent chromium, treatment, nanomaterial

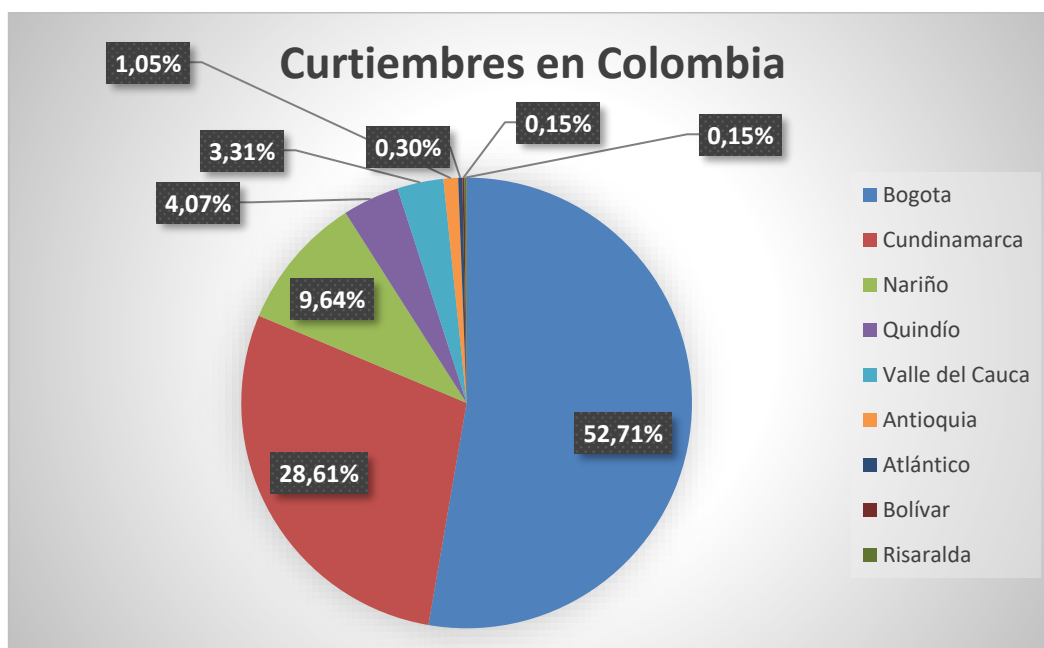
## Introducción

El agua es un recurso vital para la supervivencia y el desarrollo de la mayor parte de formas de vida conocidas por el hombre. Su distribución en el planeta se muestra en la Figura 1. De la totalidad de agua en la Tierra, el 97% es agua salada, en su mayoría en los océanos y sólo un 3% corresponde a agua dulce. (Bralower et al., 2019). En consecuencia, de la aceleración de la industria y el crecimiento de la población mundial, el consumo de agua ha aumentado vertiginosamente, lo que en el mediano plazo nos llevará a un problema de escasez de éste preciado recurso, convirtiéndose en una limitación importante para el desarrollo y para la supervivencia de los organismos del planeta (Yang et al., 2019).



*Figura 1 Distribución del agua en la Tierra. Adaptado y modificado de (Bralower et al., 2019)*

En Colombia, la industria del cuero es una de las actividades económicas más antiguas del país. Los comienzos de esta industria se ubican a mediados de los años 50, en los municipios de Villapinzón y Chocontá (considerados por Fenalcuero “la cuna del cuero”), pero a mediados de los años 60, la mayor parte de este sector productivo se vio desplazada hacia la ciudad de Bogotá, estableciéndose principalmente en el barrio San Benito de la localidad de Usme, en cercanías con el río Tunjuelito (Alcaldía de Bogotá, 2015; Vásquez Daza, 2012). En un informe proporcionado por la CAR en el año 2013, se registraron un total de 664 curtiembres en Colombia, donde más del 50% estaba registrado en Bogotá, como se muestra en la Figura 2.



*Figura 2 Curtiembres en Colombia. Adaptado y modificado de Martínez Buitrago & Romero Coca, 2018*

El curtido es el proceso de transformación de la piel de animales (principalmente de bovinos) en cuero mediante la estabilización de las fibras de colágeno con agentes curtientes para evitar la descomposición de la piel y facilitar su empleo para la manufactura de productos marroquinos, talabarteros, entre otros (Cristancho Montenegro et al., 2019). Este proceso se realiza ya sea con agentes curtientes naturales (corteza de acacia negra,

extracto de quebracho y mimosa) (Sierra García, 2018) que requieren de un tiempo prolongado entre 1 o 2 semanas para la obtención del cuero; o mediante curtientes químicos (soda caustica, taurol, sulfato de amonio, bisulfito de sodio, sulfato de cromo, tintes, entre otros) (Hernández, 2018; Ortiz & Carmona, 2015) con un periodo de curtido que oscila entre 8-24 horas.

Entre los agentes químicos como curtientes, las sales de cromo son de mayor uso, siendo cerca del 80-90% de las curtiembres a nivel mundial que utilizan estas sustancias (Chávez Andrade, 2018) para la obtención de un material resistente, flexible, uniforme y de alta calidad, conocido como “*wet-blue*” debido a que brindan al cuero una estabilidad hidrotérmica y propiedades físico-mecánicas mediante enlaces de coordinación entre los grupos carboxilo presentes en el colágeno reaccionando con los complejos de cromo teniendo lugar la reacción de curtición (Gomez et al., 2016; Miguel Córdova Bravo et al., 2013).

Adicionalmente, este tipo de cuero es un material con mayor exportación a países del continente europeo y asiático, generando ingresos de hasta 70 millones de dólares al año según datos del DANE en el año 2015 (Alcaldía de Bogotá, 2015; Belay, 2010; González Pachón, 2019). Pero como consecuencia, el uso de cromo en los procesos de curtido, pasa a ser parte de la problemática ambiental generada por los efluentes de estas industrias. Su forma hexavalente (Cr VI) es la de mayor importancia, ya que es clasificada por la EPA (Agencia de protección ambiental de EEUU) como un compuesto carcinógeno humano del grupo 1 y del grupo A (EPA et al., 2016).

El proceso en las curtiembres en general, se lleva a cabo en tres etapas: la ribera, el curtido, y por último, el acabado (Alcaldía de Bogotá, 2015), Cada etapa esta subdividida en otros procesos que son descritos en la Figura 3, a través de un flujograma indicando las etapas

del curtido, las respectivas subdivisiones, el residuo producido en cada una de las etapas, así como el porcentaje de los desechos que aportan al efluente.

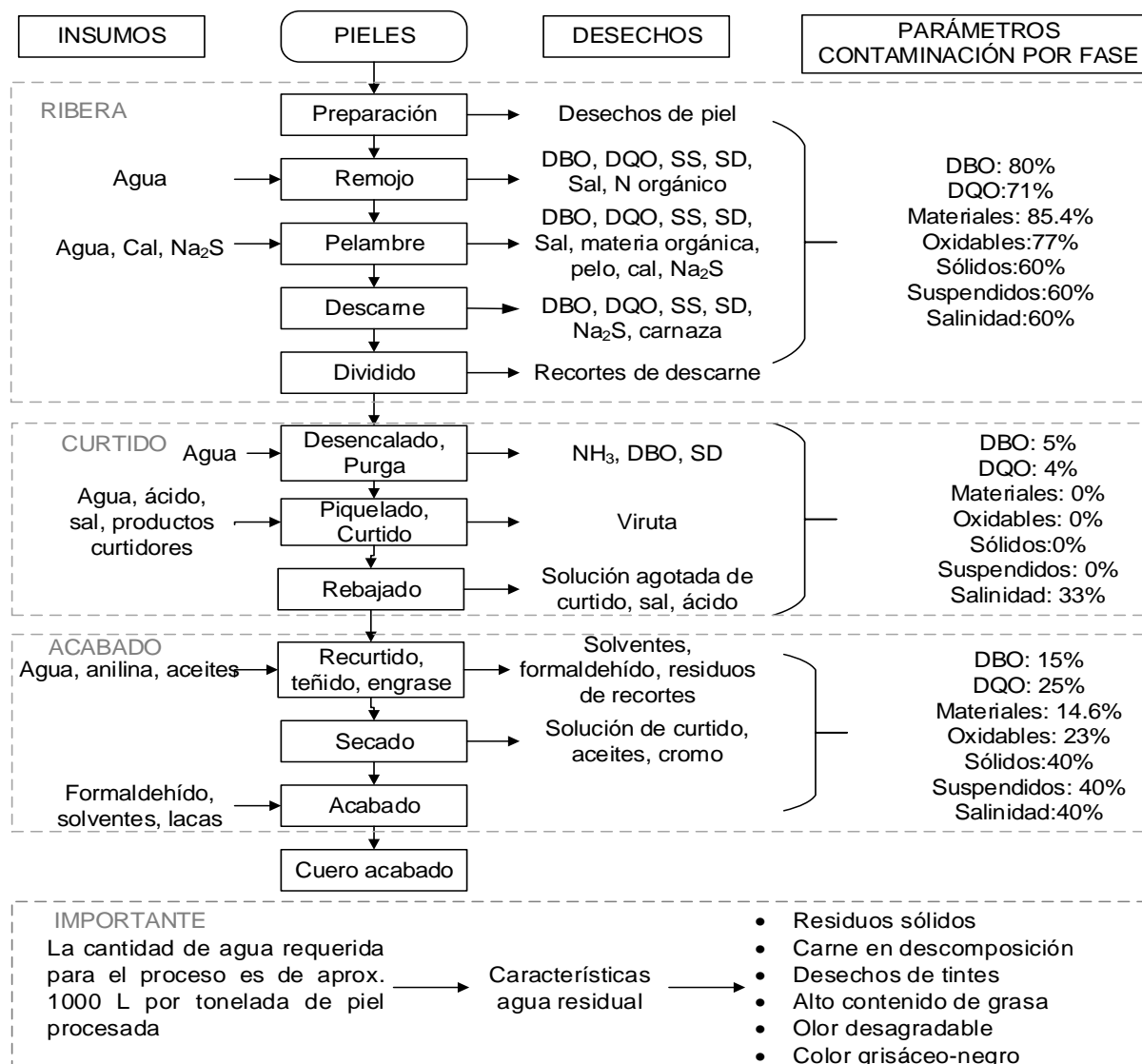
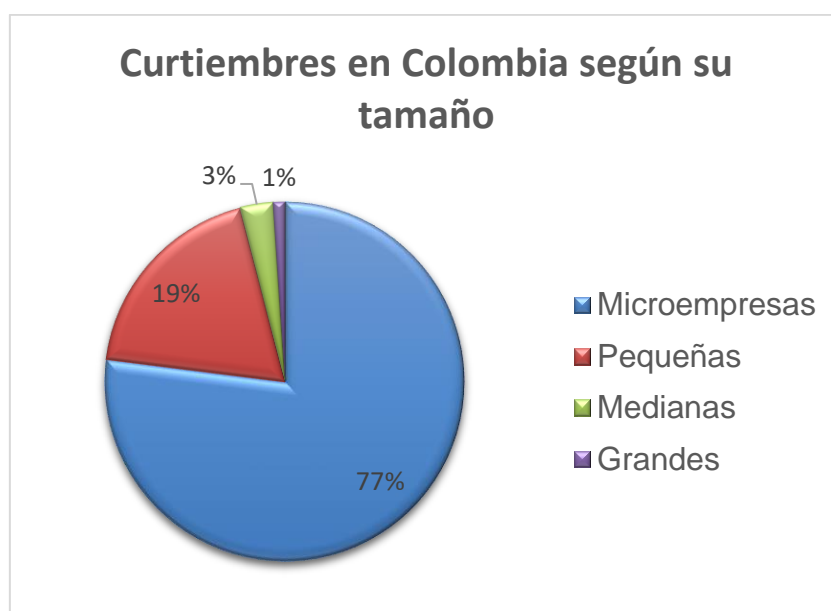


Figura 3 Flujograma del proceso de curtido. Adaptado de (González Pachón et al., 2019; Latorre Torres et al., 2014)

Los problemas ambientales existentes causados por las operaciones de las curtiembres en Colombia se deben al atraso tecnológico y al pobre desempeño de los procesos de producción más limpia, ya que, estas industrias en su mayoría son de origen familiar siendo constituidas entre las MIPYMES (microempresas, pequeñas y medianas empresas), como se indica en la Figura 4. De acuerdo a Bautista et. al en 2015, la mayoría de estas empresas

son microempresas, cuyas practicas cumplen mínimos requeridos bajo presión de la ley, integrando un sistema fisicoquímico primario mediante tanques para el tratamiento de aguas residuales solamente para la primera etapa del curtido. Además, en el sector se presenta un alto porcentaje de informalidad y prácticas poco tecnificadas, ya que muchas de éstas microempresas no tienen los recursos técnicos y económicos para implementar plantas básicas de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI) para remover sólidos suspendidos, grasas y metales pesados como el cromo (Ortiz et al., 2015; Pinilla Arbeláez et al., 2014)



*Figura 4 Porcentaje de empresas curtidoras en Colombia con base a su tamaño.*

*Adaptado y modificado de Ortiz Penagos, 2013*

En Colombia, la normativa que regula la actividad de descarga de residuos en el agua por parte del sector industrial, es desarrollado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que permite, a través de variables fisicoquímicas, conocer las condiciones de calidad de un cuerpo de agua (Franco González, Clavijo Ríos, Niño García, & Salazar Neira, 2017). Estas variables, se encuentran consolidadas y estipuladas en la Resolución 0631 de 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).



En la *Tabla 1* se encuentran los parámetros permisibles para la descarga de agua residual, así como los datos de los vertimientos generados por una empresa del sector del barrio San Benito, la mayor parte de estos parámetros establecidos en la Resolución 0631 de 2015, no se cumplen por parte de algunas empresas dedicadas a ésta actividad, con una gran variabilidad en los parámetros ya que operan por lotes, con una producción de 500 unidades por mes en jornadas no continuas, y la carga residual de sus procesos de curtido son tratadas sólo para disminuir el contenido de grasas, para remover material orgánico y luego ser vertido al alcantarillado público sin ser debidamente tratada (García Muñoz et al., 2019).

Para el año 2018, 50 curtiembres del sector de San Benito fueron selladas por el incumplimiento de la normativa con descargas que incluían residuos sólidos y peligrosos al río Tunjuelito. De las 254 empresas que en ese año el distrito supervisó, más del 50% fueron cerradas, dejando 74 establecimientos con licencia y permiso para el desarrollo de la actividad del curtido (Estupiñan et al., 2018).

*Tabla 1 Comparación de parámetros según la normativa actual vs parámetros obtenidos en caso de estudio para empresa del sector de San Benito (García Muñoz & Ramírez Rodríguez, 2019; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018)*

<b>Parámetro Físicoquímico</b>	<b>Resolución 0631 de 2015 (mg/L)</b>	<b>Efluente curtiembre (mg/L)</b>	<b>Lista de Cumplimiento</b>
Alcalinidad total	Análisis y reporte	44,96	✓
Cromo	1,5	2.307	x
Demanda bioquímica oxígeno (DBO)	600	1.763	x
Demanda química oxígeno (DQO)	1200	2.085	x
Fenoles	Análisis y reporte	0,3	✓
Grasas y Aceites	60	20	✓
pH	6-9	10	x
Sólidos disueltos totales (SDT)	600	9.552	x
Sulfato	Análisis y reporte	65,71	x
Sulfuros	3	65,71	x

Como consecuencia, el río Bogotá al ser reconocido como el segundo efluente más importante del país, el cual aporta el 31,7% del Producto Interno Bruto (PIB) (Anónimo, 2016; CAR, 2018), recibe un gran impacto ambiental cambiando su aspecto drásticamente, como se indica la Figura 5 de acuerdo a los objetivos de calidad de agua que son dispuestos por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) que van hasta un tipo 8 de contaminación (Anónimo et al., 2020; Barros et al., 2020; Franco González et al., 2017).

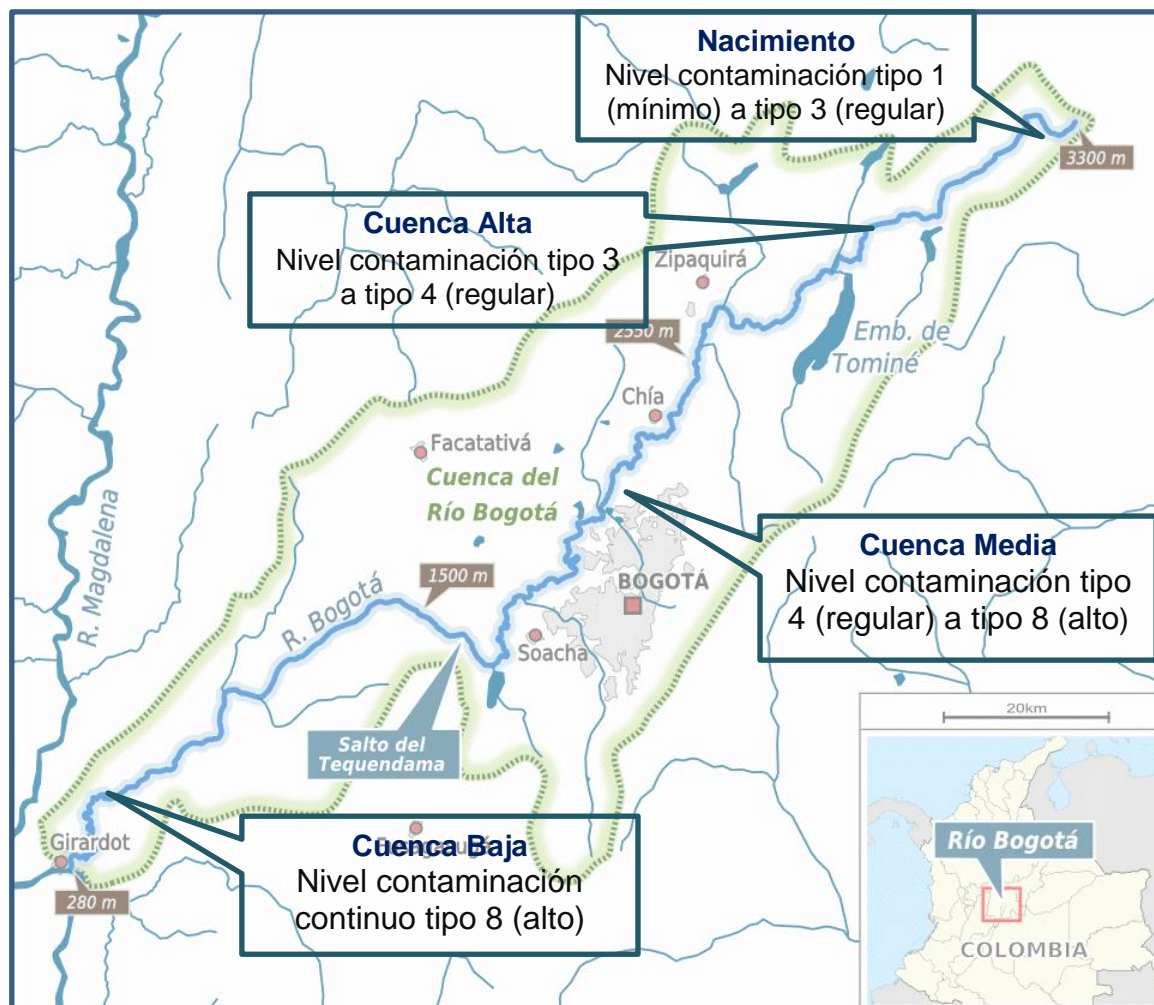


Figura 5 Nivel de contaminación del río Bogotá en cada una de sus cuencas. Adaptado y modificado de (Marín, 2019)

Los mayores responsables de la contaminación al río son vertimientos residuales domésticos e industriales de varios de los municipios que el río atraviesa. Y como ejemplo, el nivel de contaminación que aumenta en la cuenca media, se debe a las 690 toneladas diarias de vertimientos provenientes de efluentes como el río Salitre, Fucha y Tunjuelito que desembocan en el río Bogotá dejándolo anóxico y sin vida, un río muerto (Barros et al., 2020; CAR et al., 2018b).

El uso de la nanotecnología en procesos de remediación de aguas residuales industriales en el mundo, ha llevado al estudio de métodos que permitan la eliminación de desechos tóxicos que perjudican al ambiente, resaltando la presencia de metales pesados,

especialmente al daño irreversible de uno de los recursos de mayor importancia en el mundo como lo es el agua. En los últimos años, se han realizado estudios sobre nanomateriales para investigar sus aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales con metales pesados por parte de Dubey et al., 2017; Kahrizi et al., 2016; Lim et al., 2018; Liu et al., 2019 y que han mostrado un gran potencial como alternativa prometedora para la adsorción de los metales pesados de las aguas residuales.

El propósito del presente estudio se enfoca en proponer a partir de una revisión literaria un material nanoestructurado como alternativa de tratamiento terciario en efluentes hídricos del sector curtiembres. Partiendo desde identificar las posibilidades de remediación que han venido siendo empleadas en la remoción de metales pesados, empleando como modelo el Cr (VI); realizando una búsqueda literaria de estudios enfocados en nanotecnología para la remoción de Cr (VI) en aguas residuales y, por último, proponer teóricamente un material nanoestructurado con la capacidad de reducir la toxicidad y adsorber los metales pesados producidos por el sector económico de curtido de pieles.

### **Generalidades del cromo**

El cromo es un elemento natural que se encuentra distribuido en toda la naturaleza, teniendo una compleja química electrónica debido a su alto potencial de convertirse de un estado de oxidación a otro (Shahid et al., 2017). Este predomina en la naturaleza principalmente en dos estados de valencia estables: el cromo trivalente (Cr III) y el cromo hexavalente (Cr VI). Ambas formas presentan características químicas, epidemiológicas y tóxicas diferentes: el Cr VI, se encuentra en forma de cromato ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) o dicromato ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ), y es considerada la forma más tóxica del cromo, presentando un alto potencial oxidante, una alta solubilidad y una fácil movilidad a través de los organismos vivos y en el ambiente, considerándose como un potente irritante epitelial y un agente carcinógeno humano (Q. Y. Chen et al., 2019; EPA et al., 2020; Oliveira et al., 2012).

En cambio, el Cr (III), se encuentra en forma de óxidos, hidróxidos o sulfatos, siendo menos tóxico al ser insoluble en el agua, presentando una menor movilidad, considerado como un micronutriente esencial para los seres humanos, ya que es necesario para el metabolismo de azúcares y lípidos, en cambio en las plantas, en concentraciones bajas, el Cr (III), no se considera esencial, pero tiene propiedades que ayudan a promover el crecimiento y rendimiento (Chávez Andrade et al., 2018; Eskin et al., 2016; Oliveira et al., 2012), pero su acumulación en los tejidos vegetales conlleva a una alta toxicidad y daños a nivel molecular (Oliveira et al., 2012).

En la etapa de Curtido, el Cr (III) en forma de sulfato básico de cromo ( $\text{Cr(OH)SO}_4$ ), es el empleado para el proceso de curtición (García Muñoz et al., 2019). Durante el proceso, se debe valores de pH por debajo de 6.5, no usar otros agentes químicos como amoníaco, bicarbonato de sodio o aceites altamente insaturados (AFIRM GROUP et al., 2019) ya que estos factores hacen que el cromo sufra un proceso oxidativo y se transforme a Cr (VI) aumentando la toxicidad en los efluentes residuales (Apte et al., 2005; Saxena et al., 2017). Por otra parte, el vertido residual de cromo al alcantarillado conlleva también a la especiación del Cr (III) a Cr (VI), debido al vertido de sustancias químicas que han participado en otras etapas del proceso de curtido.

El proceso de curtido que se llevó a cabo en una empresa del sector de San Benito en el 2013, requirió de aproximadamente 700g-900g de sal de cromo ( $\text{Cr(OH)SO}_4$  al 25%) para el curtido de una sola piel sin pelo (dimensión del cuero de 4-5 m<sup>2</sup>, con calibre entre 1,0 a 2 mm). Para un lote de 100 pieles, se requiere de aproximadamente 48-50 kg de la sal, y para la producción de 33.000 pieles que es la cantidad estimada para un mes de trabajo, se requiere de aproximadamente 300 ton de la sal de cromo, con un coste aproximado de \$100'000.000 COP sin contar con los demás reactivos del proceso de curtido. Proporcionalmente, con el elevado uso de sales de cromo, se obtiene una elevada cantidad

resultante de cromo en las aguas residuales de las curtiembres, dependiendo de los procesos de cada MIPYME, se pueden obtener muestras con concentraciones de cromo que varían entre 2.000 y 8.000 mg/L (Ortiz Penagos et al., 2013), contrastando con lo establecido en la norma con un valor de 0.5 mg/L.

### **Tratamiento de aguas residuales**

El tratamiento de las aguas residuales aborda el problema de la disponibilidad de agua garantizando que los efluentes residuales no contaminen las fuentes hídricas en las áreas pobladas y de forma tal, puedan ser transformadas en agua tratada apta para poder ser descargadas nuevamente al efluente hídrico, contribuyendo a la reserva de agua natural global o para su rehúso en actividades domésticas o industriales, aliviando la demanda de agua dulce (Ding et al., 2017).

En general, en el tratamiento de aguas residuales se plantea dos propósitos: el primero, es llevar al mayor número de ciudades y pueblos el saneamiento necesario para la disposición segura de las aguas residuales recolectadas al ambiente después de un tratamiento y tomando en cuenta la normativa de disposición de dichos efluentes (Salgot et al., 2018). El segundo propósito es la reutilización de las aguas residuales después de haberse implementado un debido tratamiento minimizando la carga residual y disponer para otras actividades diarias (De Gisi et al., 2017); y para el debido cumplimiento de estos propósitos mencionados, el sistema típico para el tratamiento de aguas residuales consta de tres niveles de procesos siendo los tratamientos primario, secundario y terciario, resumidos en la Tabla 2 a continuación:

Tabla 2 Sistema general de tres niveles para tratamiento de aguas residuales. Adaptado de (Ding et al., 2017)

Tratamiento	Propósito	Procesos
Primario (mecánico)	Proceso de purificación preliminar para eliminar sustancias gruesas, suspendidas y flotantes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cribado para atrapar sustancias sólidas</li> <li>• Sedimentación por gravedad para eliminar sólidos en suspensión.</li> </ul>
Secundario (biológico)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implica la oxidación de materia orgánica disuelta por medio de lodos biológicos activos que luego se filtran.</li> <li>• Elimina la materia orgánica disuelta que escapan al tratamiento primario.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usar microorganismos que digieren sustancias orgánicas como metabolitos para su crecimiento y reproducción.</li> <li>• Circulación del agua en un reactor manteniendo una alta concentración de microorganismos</li> </ul>
Terciario	Proceso adicional para convertir las aguas residuales en agua de buena calidad para adaptarse a diferentes propósitos de uso	Uso de tecnología avanzada con métodos químicos o biológicos de alto costo para remover nitrógeno o fósforo.

Las MIPYMES del sector curtiembre, buscan alternativas para la reducción de la carga residual, teniendo como primera instancia las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la ciudad (Carreño Sayago et al., 2016) que a través de procesos físicos, químicos y biológicos, ayudan a remover parcialmente mediante tratamientos primarios y secundarios, los residuos sólidos gruesos y grasas, pero estos procesos no incluyen componentes como son los metales pesados. En la Tabla 3, se presentan los procesos físicos, químicos y biológicos existentes en PTAR Salitre de Bogotá, ubicada en el noroccidente la ciudad, antes de su modernización para el tratamiento de aguas del sector industrial y del cual se evidencia que no se incluyen los metales pesados en los tratamientos. Cabe resaltar, que, en la zona sur de Bogotá, para las empresas del sector de San Benito, este tipo de tratamientos mediante PTAR no son posibles, ya que en esa zona no hay una planta de tratamiento y los vertidos de las empresas son difundidos a través del alcantarillado público, lo cual conlleva al vertido directo al río Tunjuelito.

Tabla 3 Tratamientos de aguas residuales en PTAR de la ciudad de Bogotá. Adaptado y modificado de Cardona Pérez, 2018; *Documentación IDEAM*, n.d.; Secretaría Distrital de Ambiente Alcaldía de Bogotá, n.d.

Método	Descripción	Etapa del tratamiento
Físicos: son aquellos en los que predominan las acciones de las fuerzas físicas.		
Desbaste	Eliminación de sólidos gruesos y sedimentables por intercepción, mediante el uso de rejillas.	Preliminar
Trampa de grasas	Se separa las grasas no emulsionadas de los componentes ligeros del agua residual.	Preliminar
Flotación	Entrada de aire a mayor presión permite que los sólidos suspendidos más livianos asciendan a la superficie para ser removidos.	Preliminar
Sedimentación	Separa los sólidos del agua en un tanque, que por el tiempo de retención permite la precipitación de los mismos.	Primario
Filtración	Eliminación de los sólidos en suspensión residuales, mediante mallas o filtros.	Preliminar
Químicos: son procesos en donde la eliminación y conversión de los contaminantes se consigue mediante la adición de sustancias químicas.		
Mezclado/ Desarenador	Mezcla de productos químicos y gases con aguas residuales, separando arena y partículas más pesadas que los sólidos controlando el tiempo de retención	Preliminar
Coagulación	Adición de productos químicos (sulfato o cloruro de aluminio) a las aguas residuales para que se adhieran sólidos en suspensión y se precipiten	Primario
Precipitación química	Uso de compuestos químicos que permitan la eliminación de fósforo y mejore la eliminación de los sólidos	Primario
Desinfección	Uso de compuestos clorados, realizar la eliminación de organismos patógenos	Primario
Biológicos: eliminación de contaminantes mediante la actividad biológica de algunos microorganismos que asimilan la materia orgánica presente en las aguas residuales.		
Lodos activados	Remoción de la materia orgánica, mediante microorganismos formando partículas gelatinosas de lodo suspendidas en un tanque de aireación para posteriormente ser sedimentadas.	Secundario
Nitrificación/ desnitrificación	Remoción de nitrógeno mediante oxidación biológica del amoníaco a nitrato (nitrificación). Mediante reducción, el nitrato es convertido a nitrógeno (desnitrificación) que es emitido a la atmósfera.	Terciario



Se ha documentado que en algunas de las empresas curtidoras, se han implementado métodos químicos para la remoción de cromo de las aguas residuales, mediante el empleo de floculantes (aglutinadores de sólidos) como el sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), hidroxiclорuro de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2$ ) (Ortiz et al., 2015). Este tipo de floculantes, tienen un mayor empleo en cuanto al tratamiento de aguas residuales, debido a factores como el rendimiento, la disponibilidad, el costo y efectividad. Pero a su vez, el uso de este tipo de agentes en los procesos fisicoquímicos del tratamiento de aguas residuales que a pesar de que tiene una alta capacidad de coagulación, conlleva a que pueden ser altamente nocivos para la salud humana y el ambiente (Bravo Gallardo et al., 2017) presentando un efecto neurotóxico en los humanos y al no ser biodegradables, presentan una alta toxicidad en el ambiente (Okaiyeto et al., 2016).

Bautista et. al en 2015, a través de un censo en las curtiembres del sector de San Benito para observar las estrategias de responsabilidad social frente al impacto ambiental, observaron que estas empresas integran un sistema físico-químico primario para el tratamiento de las aguas residuales que se producen en la primera fase del proceso, siendo el pelambre y el curtido al cromo. El agua utilizada en el proceso es almacenada en pozos subterráneos, luego es trasladada por motobombas a través de un sistema de tuberías de PVC para almacenar en tanques donde se realizan los tratamientos físico-químicos (estos no son mencionados en el trabajo al ser una observación cualitativa) con el fin de descargar al alcantarillado sin residuos sólidos o ser reutilizado en procesos de pelambre.

### **Procesos de remoción de cromo**

Los tratamientos convencionales de las aguas residuales presentados en la Tabla 3, remueven los metales pesados, ya que estos están contenidos en compuestos residuales como las grasas, los sólidos disueltos, o en los lodos precipitados, y como disposición final,

son llevados a rellenos sanitarios o ser utilizados como residuos biosólidos para determinadas actividades, como compostaje en zonas verdes, agricultura, pastizales para ganadería, plantaciones forestales, abonos o fertilizantes orgánicos, entre otros (Koei et al., 2011). Lo que conlleva que los metales pesados, no son tratados de manera adecuada y por tanto actúan directamente en la contaminación ambiental y en la afectación de la salud de los seres vivos.

Por ello, se ha aplicado tecnologías que actúan como tratamientos terciarios y permiten la remoción de Cr (VI) de las aguas residuales, siendo complementarios para los procesos primarios y secundarios (Tabla 3) logrando efluentes más puros, con menor carga contaminante y que pueda ser utilizado en actividades como la recarga de acuíferos, recreación, agua industrial (Artunduaga Cuellar et al., 2015). Entre estos tratamientos se encuentran la precipitación química, la osmosis inversa, intercambio iónico, filtración, procesos redox, adsorción (Kalidhasan et al., 2016; Kan et al., 2017).

Tabla 4 Tratamientos terciarios tradicionales para la remoción de Cromo en aguas residuales

Tratamiento terciario	Descripción	Ventaja	Desventaja	Autores
Precipitación química	Proceso donde actúan agentes precipitantes químicos (NaOH, NH <sub>4</sub> OH, PbSO <sub>4</sub> ) que reaccionan con el ion del metal pesado, transformándolo en una partícula insoluble. Su producto es separado ya sea por sedimentación o filtración.	Simple y efectivo	Contaminación secundaria, ajuste a pH básica	(Azimi et al., 2017; Mitra et al., 2017; Peng et al., 2018, 2020)
Intercambio iónico	Reacción reversible de iones entre una fase sólida y líquida. Mediante el uso de resinas con iones cargados que son intercambiados por otros iones del medio. El metal pesado forma un complejo con el contraión y el grupo funcional de la resina	Alta eficiencia, bajo costo, menor volumen de lodos, alta selectividad	Dependencia del material de la resina y del entorno de la solución	(Maitlo et al., 2019; Nam et al., 2018; Peng et al., 2020)
Filtración / membranas	Método simple de separación mediante membranas semipermeables con diferente tamaño de poro que a través de un flujo con alta presión permite el paso del solvente atrapando el soluto (metales pesados).	Eficiencia, sin contaminación secundaria, menor consumo energético	Dependencia del material, exclusión de carga, tamaño del poro	(Azimi et al., 2017; Kazemi et al., 2018; Mnif et al., 2017; Religa et al., 2011; Salman et al., 2020)
Redox/ Electroquímica	Procesos que usan energía eléctrica para realizar la reducción de Cr (VI) a Cr (III), a través de electrodos (Al, Fe, Pb, entre otros). Se destacan la electrocoagulación, Reducción electroquímica y electrodiálisis.	Operación simple, bajo consumo de energía	Sacrificio de electrodos, alto costo de los electrodos, productos secundarios	(Azimi et al., 2017; GracePavithra et al., 2019; Peng et al., 2019, 2020; Zhao et al., 2018)
Adsorción	Método fisicoquímico de mayor uso en el tratamiento de aguas residuales con metales pesados. Se basa en la transferencia de masa entre la fase líquida y la fase sólida denominada adsorbente. Este proporciona grandes superficies y una alta capacidad de adsorción. Su proceso puede ejecutarse en modo reversible y los adsorbentes se regenerarán por desorción. El carbón activado es el principal representante de este proceso.	Alta eficiencia, operación simple y facilidad de regeneración.	Depende en gran medida del entorno de la solución, carbón activado costoso.	(Azimi et al., 2017; GracePavithra et al., 2019; Kalidhasan et al., 2016; Kan et al., 2017; Panda et al., 2017; Peng et al., 2020)

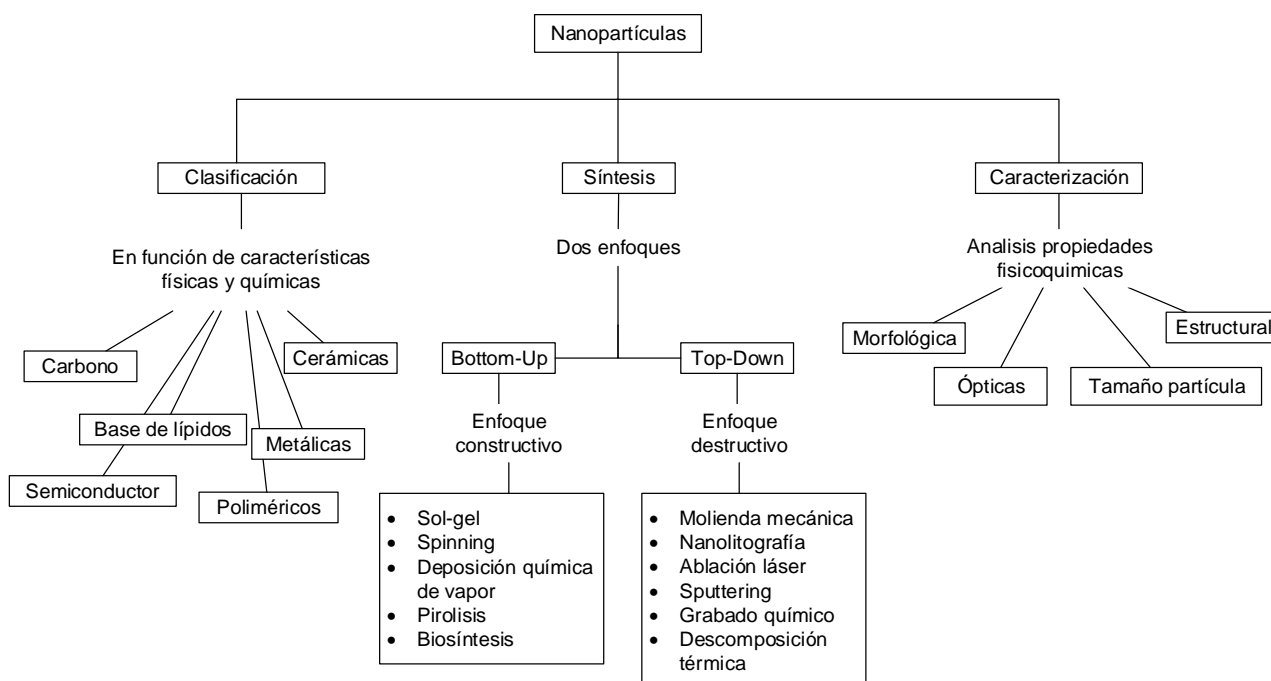
Los tratamientos terciarios para la remoción de cromo descritos anteriormente, presentan ventajas respecto a su operación simple y fácil manejo, pero conlleva a que tenga desventajas económicas, la composición de los materiales para el proceso, la formación de productos secundarios y el entorno del medio en el que se llevan a cabo el tratamiento. Aún así, es descrito que el método de adsorción se considera un método eficaz debido al bajo costo inicial, la flexibilidad en el diseño y la facilidad de operación, además, este tratamiento no implica la formación de residuos secundarios en el tratamiento del agua residual (GracePavithra et al., 2019; Mitra et al., 2017). Aunque los sorbentes tradicionales son capaces de eliminar metales pesados de las aguas residuales, sus sutiles capacidades y eficiencias de sorción limitan sus aplicaciones en soluciones concentradas, lo que ha exigido el desarrollo de diversos adsorbentes rentables para la eliminación de metales pesados de aguas residuales contaminadas con metales (Lakherwal et al., 2014; Ray et al., 2015).

### **Nuevas alternativas para remoción de cromo**

La búsqueda de nuevas alternativas para el tratamiento de vertimientos no solo del sector del curtido sino de las aguas residuales en general en países del viejo continente, se focaliza en una necesidad real existente de una tecnología eficaz para el tratamiento de aguas residuales de la industria (Ferroudj et al., 2013). Estas alternativas surgen de campos emergentes como la nanotecnología, donde el control y reestructuración de la materia a niveles atómicos y moleculares en el rango de 1 a 100 nm, muestran propiedades considerables a sus contrapartes a gran escala, entre estas se destacan su gran área superficial específica, la alta reactividad química, comportamientos de superparamagnético, y difusión rápida. El diseño de los nanomateriales se basa en metales, óxidos metálicos y materia orgánica basada en carbono (Bhushan et al., 2017; Hasan et al., 2015; Liu et al., 2019; Nogueira et al., 2015).

La nanotecnología ha sido aplicada en el tratamiento de aguas residuales, y se ha desarrollado una variedad de nanomateriales que son eficientes, ecológicos y rentables con una función única para la descontaminación potencial de efluentes industriales, aguas superficiales, aguas subterráneas y agua potable (Anjum et al., 2019); estos nanomateriales al presentar una gran área superficial, son adsorbentes por excelencia, por tanto se utilizan ampliamente en el tratamiento de aguas residuales que contienen metales pesados, además superan antiguas deficiencias en el tratamiento de adsorción proporcionando sistemas con mayor eficiencia de eliminación, baja generación de residuos y adsorción específica, permitiendo la eliminación eficiente de metales pesados en aguas residuales (Azimi et al., 2017; Jin et al., 2016; Peng et al., 2020; Thekkudan et al., 2017).

Se ha documentado que varios nanomateriales han servido como material adsorbente para la remoción de Cr (VI), estos se pueden encontrar en forma de nanotubos de carbono (Anastopoulos et al., 2017), nanocristales (G. Chen et al., 2017), fullerenos (Yao et al., 2020) , nanopartículas (Almeida et al., 2019); pero la forma que prevalece con un mayor uso son las nanopartículas. En la Figura 6, se describe de manera general la composición de las nanopartículas, la síntesis y la caracterización de las mismas.



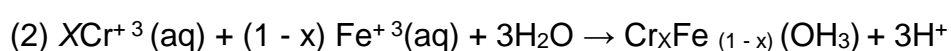
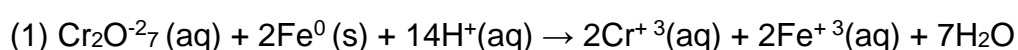
*Figura 6 Descripción general de las nanopartículas. Adaptado de Ealias et al., 2017; Khan et al., 2019*

### Revisión literaria: nanopartículas con propiedades adsorbentes

La mayoría de nanopartículas estudiadas que funcionan como adsorbentes del Cr (VI) destacan el uso de óxidos metálicos como composición principal para la síntesis de este nanomaterial (Thekkudan et al., 2017). El material de mayor estudio que presenta composición de un óxido metálico, son las nanopartículas de óxido de hierro, que son comúnmente llamadas nanopartículas magnéticas (Lisjak et al., 2018) . La presencia de hierro les confiere propiedades magnéticas que les permiten separarse fácilmente de las aguas residuales mediante el uso de un campo magnético externo. Además, son altamente reciclables, no son tóxicas, y su costo es sumamente bajo (F. S. A. Khan et al., 2020).

Las nanopartículas de óxido de hierro, pueden tener una fuerza superparamagnética, donde destacan especies de hierro como la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y la maghemita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), esta propiedad actúa como un gran átomo paramagnético debido a los momentos magnéticos significativos y tiene una mayor respuesta frente a un campo magnético externo, a su vez al retirar dicho campo, estas nanopartículas pierden su magnetismo (Justin et al., 2017; Samrot et al., 2019). Además, el dopaje de este tipo de nanopartículas con otros compuestos, permite una mayor capacidad de adsorción mejorando la remoción del cromo en las aguas residuales (Nematollahzadeh et al., 2015).

Otro tipo de nanoadsorbentes basados en hierro, son las nanopartículas de hierro cero valente (nZVI), las cuales también son consideradas para la remediación ambiental del Cr (VI) (Pakade et al., 2019). Estas destacan ya que el potencial redox del cromo es mucho más positivo que el del  $\text{Fe}^0$ , reduce la forma hexavalente del cromo a su forma trivalente (ella misma se oxida a  $\text{Fe}^{+3}$ ), que luego precipita junto con  $\text{Fe}^{+3}$  en la superficie de la nanopartícula (Mitra et al., 2017). Este proceso puede ser ilustrado con las siguientes ecuaciones (Ezzatahmadi et al., 2017):



Al igual que las nanopartículas de óxido de hierro, el material tradicional de  $\text{Fe}^0$  con partículas de gran tamaño, como la chatarra de hierro, tiene poca capacidad para la eliminación de Cr (VI), y la reacción se verá impedida cuando la capa pasiva se amontone, lo que provocará una ineficiencia en la transferencia de electrones y una baja utilización del material de hierro (Shi et al., 2018). A su vez, este material es propenso a aglomerarse y reacciona rápidamente con sustancias como el agua y el oxígeno disuelto, lo que conlleva a una rápida disminución de la reactividad para la eliminación de metales pesados (Wu et

al., 2021), por ello también se implementan estabilizadores, recubrimientos o la combinación con otros metales para modificar la superficie de las nZVI y tengan un mejor rendimiento en el proceso de remediación de Cr (VI) (Fu et al., 2013; F. Wang et al., 2018; Zhou et al., 2018).

Al mejorar las propiedades de la superficie de las nanopartículas, estas pasan a ser consideradas como nanocompuestos, para el caso de las nanopartículas magnéticas, permite el recubrimiento adecuado del núcleo magnético evitando la alteración de las propiedades magnéticas de la nanopartícula desnuda, aumentando su especificidad frente al metal a remover (Ojemaye et al., 2017). Entre los recubrimientos más adecuados, la sílice (Si) es el material adsorbente más utilizado en técnicas de purificación de agua (Kamegawa et al., 2016). El revestimiento con Si activa la superficie de las nanopartículas que tienen varios grupos funcionales debido a la abundante presencia de grupos silanol en la capa de sílice. También protege los NP de la lixiviación en situaciones de pH bajo (Kaushal et al., 2017).

Además, con el fin de mejorar la capacidad de adsorción y la selectividad de las nanopartículas magnéticas recubiertas de sílice para la eliminación de iones de metales pesados, se ha investigado ampliamente la modificación de la superficie con nuevos grupos funcionales, como óxidos férricos, óxidos de aluminio, óxidos de titanio y óxidos de cerio. Entre esa variedad de óxidos metálicos, el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) con características favorables como la alta área superficial, inercia biológica y química, alta capacidad de adsorción, fotorreactividad y su baja toxicidad es adecuado para la alta eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Sobhanardakani et al., 2017). A su vez, las características fotocatalíticas extremadamente fuertes, pueden reforzar directamente a las nanopartículas magnéticas, mejorando aún más la actividad fotocatalítica del  $\text{TiO}_2$  (F. S. A.



Khan et al., 2020) A continuación, en la Tabla 5, se presentan algunas nanopartículas y nanocompuestos para la remoción de cromo (VI).

Tabla 5 Nanopartículas y nanocompuestos para la remoción de Cr(VI)

Material	Síntesis	Tipo de agua	pH	Dosis cromo	Capacidad remoción	Referencia
<i>NPs Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></i>	Sol-gel	Agua simulada	4.0	25 g/L	~88%	(Hossain et al., 2018)
<i>NPs Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></i>	Co-precipitación química	Agua simulada	5.0	2-100 mg/L	~75%	(Rajput et al., 2016a)
<i>NPs Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></i>	Co-precipitación química	Agua Natural	7.0	50 µg / L	~100%	(Simeonidis et al., 2015)
<i>NPs Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> recubierta con catecolamina</i>	Co-precipitación química	Agua ultra pura	3.0	100 mg/L	~97%	(Nematollah zadeh et al., 2015)
<i>NPs Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> recubierta con quitosano</i>	Co-precipitación ; recubrimiento	Agua MilliQ	2.0	7 g/L	~ 80.4% SPIONs ~ 99.7 % Cs-SPIONs	(Samrot et al., 2019)
<i>NPs fotocatalíticas Magnéticas NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub></i>	Co-precipitación ; sol-gel	Agua simulada	1.0 - 5.0	No se menciona	~98%	(Ojemaye et al., 2017)
<i>NPs bimagnéticas CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>@γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	Co-precipitación hidrotermal	Agua MilliQ	2.5	1000 mg/L	~ 98%	(Campos et al., 2019)
<i>nZVI</i>	Síntesis verde, extracto de planta	Muestra de agua lago Puliyanthan gal	7.5	1 mg/L	~ 50%	(Ahamed et al., 2018)
<i>nZVI con soporte de lana de roca residual</i>	Co-precipitación	Agua simulada	2.0	200 mg/L	~97%	(Zhou et al., 2018)
<i>nZVI soportado por resina</i>	Método reducción borohidruro	Agua destilada	3.0	20 mg/L	~84.4%	(Fu et al., 2013)
<i>nZVI soportado con bentonita</i>	Método reducción borohidruro;	Agua desionizada	3.0 2.0	50 mg/L 53 mg/L	~100% ~90%	(F. Wang et al., 2018)

	co-precipitación	Agua lixiviada				
<i>Nanocompuesto SiO<sub>2</sub>/nano-FeC<sub>2</sub>O<sub>4</sub></i>	Derivados de biotita	Agua desionizada	2.0 – 6.0	20 mg/L	~95%	(Zeng et al., 2020)
<i>NPs Core-Shell Fe@SiO<sub>2</sub></i>	Método modificado Stöber con KBH <sub>4</sub>	Agua Simulada	3.0	No mencionado	~90%	(Thanh Ho et al., 2018)
<i>Nanocompuesto Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/quitosano magnético</i>	Polimerización; co-precipitación; ultrasonido.	Agua simulada	2.5	150 mg/L	~96,4%	(X. Wang et al., 2020)
<i>NPs Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/ácido diglicólico</i>	Hidrolisis oxidativa; sol-gel	Agua simulada	3.0	No se menciona	~50 %	(Nawaz et al., 2020)
<i>NPs TiO<sub>2</sub></i>	Ultrasonidos	Agua MilliQ	7.0	20 mg/L	~52%	(Paul et al., 2015a)
<i>NPs TiO<sub>2</sub> en presencia de ácido fórmico</i>	NPs comerciales	Agua simulada	---	30 µg/L	~90%	(Islam et al., 2019)
<i>Nanocompuesto TiO<sub>2</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></i>	Co-precipitación; síntesis hidrotérmica	Agua simulada	---	---	~95%	(Predescu et al., 2016)
<i>NPs TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (remoción Cd (II), Hg (II), Ni(II))</i>	Co-precipitación; ultrasonido; sol-gel	Agua simulada	7.0	20 mg/L para todos los metales	~100% Hg ~ 95% Cd ~ 85% Ni	(Sobhanardakani et al., 2017)

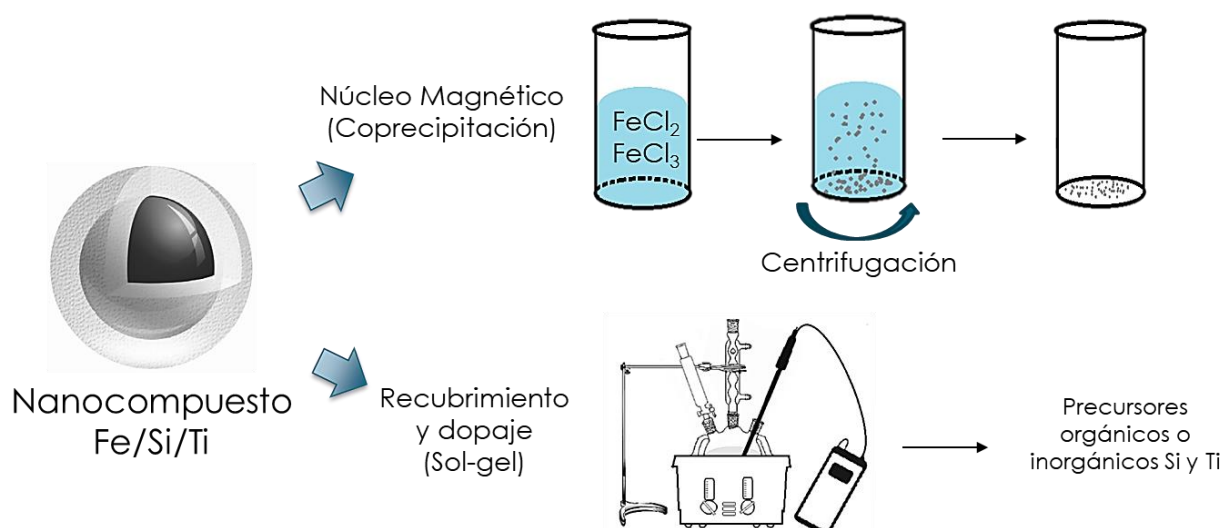
#### Glosario

- NPs: Nanopartículas
- nZVI: Nanopartículas hierro Cero valente

### Nanomaterial teórico para la remoción de Cromo en aguas residuales de la industria del curtido

Con base en la información recolectada anteriormente, se puede destacar una infinidad de nanomateriales monoelementales o compuestos, que tienen un gran potencial para su aplicación en la remoción de cromo en las aguas residuales de la industria del curtido. Como propuesta para futuras investigaciones y trabajos de grado, se plantea teóricamente que una solución de nanomaterial se puede basar en el uso de elementos como Fe, Si y Ti,

donde la conformación estructural fuese tipo core-Shell o recubierto, con un núcleo magnético basado en óxido de hierro tipo Magnetita con propiedad superparamagnética, con una síntesis a través del método de co-precipitación mediante precursores férricos como el  $\text{FeCl}_3$  y  $\text{FeCl}_2$ . El recubrimiento del núcleo a partir del método sol gel y asistido por ultrasonidos, con precursores orgánicos e inorgánicos de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{TiO}_2$  aumentando el área superficial y la capacidad reductora al contacto con el cromo, permitiendo una mayor adsorción del metal, lo anteriormente descrito se ilustra en la Figura 7. Además, estudiar las propiedades de desorción del material para que al final del proceso de remoción del cromo, puedan ser nuevamente utilizadas como material adsorbente y sea aplicado a varios ciclos disminuyendo el costo de producción.



*Figura 7 Representación metodología teórica para la síntesis de nanomaterial*

## Conclusiones

Entre los diversos materiales presentados en la Tabla 5, se han utilizado tanto nanopartículas de un solo componente (Ahamed et al., 2018; Hossain et al., 2018; Islam et al., 2019; Paul et al., 2015b; Rajput et al., 2016b; Simeonidis et al., 2015); nanopartículas recubiertas (Nawaz et al., 2020; Nematollahzadeh et al., 2015; Samrot et al., 2019);

nanocompuestos (Campos et al., 2019; Nawaz et al., 2020; Ojemaye et al., 2017; Predescu et al., 2016; Sobhanardakani et al., 2017; Thanh Ho et al., 2018; X. Wang et al., 2020; Zeng et al., 2020).

Tienen en común varios aspectos descritos como lo es el método de síntesis donde predomina el método de co-precipitación que es generalmente para la síntesis del núcleo de la nanopartícula o simplemente para la nanopartícula sencilla; el tipo de agua estudiada, siendo la mayoría simulaciones con concentraciones de cromo a través de la disolución de dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) presentando resultados positivos con grandes porcentajes de remoción que abarcan entre el 80% - 100%, determinando que estos nanomateriales son una gran opción para la implementación en tratamientos de aguas residuales de las curtiembres. Sin embargo, pocos son los estudios que muestran la eficiencia correspondiente frente a aguas reales contaminadas con Cr (VI), ya que se utilizan sistemas monoelementales presentando como único contaminante el Cr.

El único estudio que presenta un resultado frente a la exposición del nanomaterial adsorbente en agua real es el presentado por Ahamed et al., 2018. Ellos determinan que solo el 50% del cromo presente en el agua residual de un lago de la India, es reducida, presentando factores que afectan al nZVI como la turbidez de la muestra, la presencia de otras sustancias químicas que puedan afectar la superficie del material, dificultando así el proceso de reducción de cromo.

Otro factor en común de estos materiales, es la funcionalidad del nanomaterial en un pH ácido, la mayoría de los estudios presentan un mejor rendimiento a pH que oscilan entre 1.0 -5.0. Pero si se someten estos materiales a aguas residuales de la industria de las curtiembres, no llegarían a ser efectivas, ya que los diferentes autores demuestran que, al momento de cambiar el pH de la solución acuosa con Cr, la eficiencia y rendimiento de los nanoadsorbentes disminuye parcial o totalmente, dado que el indicador de pH que se tiene

para los vertidos provenientes de esta industria en Colombia se encuentran establecidos en pH que oscilan entre 6-9 e incluso mayores a este intervalo.

Los trabajos publicados y de ellos algunos mencionados en este documento, solo tienen una prueba de concepto teórico para formular una solución frente a la remoción de Cr en aguas residuales reales del sector curtiembre presentando una aplicación monoelemental. Se requiere de la participación del sector investigativo para el avance de ensayos de eliminación en laboratorio tomando en cuenta las condiciones realistas, formulando propuestas de síntesis de nuevos nanomateriales o el mejoramiento de los ya existentes, promoviendo los nanomateriales que tienen un mayor uso frente a la remoción del Cr (VI) como los basados en óxidos de hierro, óxidos de sílice y óxidos de titanio que presentan propiedades compatibles para reforzar un nanocompuesto que tenga una propiedad superparamagnética recubierta con sílice que permita aumentar la capacidad de adsorción frente a metales pesados y sean dopadas con óxidos de titanio para aumentar la eficiencia reductiva del Cr (VI) a su forma menos tóxica (Cr(III)), además generando una solución sostenible que permita utilizar energías renovables como la luz solar y sea una solución reciclable, si la nanopartícula es tratada de forma tal que se pueda usar en varios ciclos durante el tratamiento de las aguas residuales y permita desorber el metal recolectado para una posterior disposición y reutilización en el proceso de curtido.

### **Agradecimientos**

Agradezco la colaboración y contribución en este trabajo de grado a los profesores del semillero de investigación NanoMat, a mi familia por el apoyo constante durante el tiempo de estudio. A mis compañeras de trabajo por la compañía y apoyo durante el recorrido académico.

Este trabajo monográfico se encuentra adjudicado dentro del proyecto de investigación especial 2019227 “Desarrollo de un recubrimiento bioinspirado a través de sonoquímica

para la separación de aceite” de la convocatoria interna de proyectos de investigación 2019 de la Universidad Antonio Nariño.

## Referencias

- AFIRM GROUP. (2019). *Documento informativo sobre sustancias químicas: Cromo VI*. <https://echa.europa.eu/substances-restricted-under->
- Ahamed, M. I. N., Rajeshkumar, S., Ragul, V., Anand, S., & Kaviyarasu, K. (2018). Chromium remediation and toxicity assessment of nano zerovalent iron against contaminated lake water sample (Puliyanthangal Lake, Tamilnadu, India). *South African Journal of Chemical Engineering*, 25, 128–132. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2018.04.004>
- Alcaldía de Bogotá. (2015). *Guía de producción más limpia para el sector curtiembres de Bogotá Enfoque en vertimientos y residuos*. [http://www.ambientebogota.gov.co/web/sda/search?p\\_auth=cpOG8bqA&p\\_p\\_auth=y3HWCdzt&p\\_p\\_id=20&p\\_p\\_lifecycle=1&p\\_p\\_state=exclusive&p\\_p\\_mode=view&\\_20\\_struts\\_action=%2Fdocument\\_library%2Fget\\_file&\\_20\\_groupId=24732&\\_20\\_folderId=3987253&\\_20\\_name=21215](http://www.ambientebogota.gov.co/web/sda/search?p_auth=cpOG8bqA&p_p_auth=y3HWCdzt&p_p_id=20&p_p_lifecycle=1&p_p_state=exclusive&p_p_mode=view&_20_struts_action=%2Fdocument_library%2Fget_file&_20_groupId=24732&_20_folderId=3987253&_20_name=21215)
- Almeida, J. C., Cardoso, C. E. D., Tavares, D. S., Freitas, R., Trindade, T., Vale, C., & Pereira, E. (2019). Chromium removal from contaminated waters using nanomaterials – A review. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 118, 277–291. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.05.005>
- Anastopoulos, I., Anagnostopoulos, V. A., Bhatnagar, A., Mitropoulos, A. C., & Kyzas, G. Z. (2017). A review for chromium removal by carbon nanotubes. *Chemistry and Ecology*, 33(6), 572–588. <https://doi.org/10.1080/02757540.2017.1328503>
- Anjum, M., Miandad, R., Waqas, M., Gehany, F., & Barakat, M. A. (2019). Remediation of wastewater using various nano-materials. In *Arabian Journal of Chemistry* (Vol. 12, Issue 8, pp. 4897–4919). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.10.004>
- Anónimo. (2016). *La contaminación del río Bogotá impide aprovechar su potencial*. Revista Dinero. <https://www.dinero.com/economia/articulo/la-contaminacion-del-rio-bogota-impide-aprovechar-su-potencial/226565>
- Anónimo. (2020). *Río Bogotá, un guerrero ancestral que espera su renacer*. Revista Semana. <https://sostenibilidad.semana.com/actualidad/articulo/rio-bogota-un-guerrero-ancestral-que-espera-su-renacer/49052>
- Apte, A. D., Verma, S., Tare, V., & Bose, P. (2005). Oxidation of Cr(III) in tannery sludge to Cr(VI): Field observations and theoretical assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 121(1–3), 215–222. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.02.010>
- Artunduaga Cuellar, O. F. (2015). Tratamientos para la remoción de Cromo (VI) presente en aguas residuales. *Revista Nova*, 1(1). <https://doi.org/10.23850/25004476.187>

- Azimi, A., Azari, A., Rezakazemi, M., & Ansarpour, M. (2017). Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewaters: A Review. *ChemBioEng Reviews*, 4(1), 37–59. <https://doi.org/10.1002/cben.201600010>
- Barros, J. (2020). *¿Por qué la cuenca media es la que más contamina al río Bogotá y cómo recuperarla?* Revista Semana. <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/por-que-la-cuenca-media-es-la-que-mas-contamina-al-rio-bogota-y-como-recuperarla/49548>
- Bautista Franco, C. L., Moreno Vargas, C. C., & Socha Matiz, A. (2015). *Estrategias de responsabilidad social ambiental de las curtiembres en la localidad de Tunjuelito* [Universidad Cooperativa de Colombia]. [https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/10378/1/2015\\_estrategias\\_responsabilidad\\_social.pdf](https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/10378/1/2015_estrategias_responsabilidad_social.pdf)
- Belay, A. A. (2010). Impacts of Chromium from Tannery Effluent and Evaluation of Alternative Treatment Options. *Journal of Environmental Protection*, 1, 53–58. <https://doi.org/10.4236/jep.2010.11007>
- Bhushan, B. (2017). Introduction to nanotechnology. In *Springer Handbooks* (pp. 1–19). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-54357-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-54357-3_1)
- Bralower, T., & Bice, D. (2019). *Distribution of Water on the Earth's Surface | EARTH 103: Earth in the Future*. <https://www.e-education.psu.edu/earth103/node/701>
- Bravo Gallardo, M. A. (2017). *Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales*. [Universidad Distrital Francisco José Caldas]. <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5609/1/BravoGallardoMonicaAlejandra2017.pdf>
- Campos, A. F. C., de Oliveira, H. A. L., da Silva, F. N., da Silva, F. G., Coppola, P., Aquino, R., Mezzi, A., & Depeyrot, J. (2019). Core-Shell Bimagnetic Nanoadsorbents for Hexavalent Chromium Removal from Aqueous Solutions. *Journal of Hazardous Materials*, 362(May 2018), 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.09.008>
- CAR. (2018). *CAR | Río Bogotá*. [https://www.car.gov.co/rio\\_bogota](https://www.car.gov.co/rio_bogota)
- Cardona Pérez, V. (2018). *Plantas de tratamiento de aguas residuales del río Bogotá generan gases de efecto invernadero | Universidad Central*. <https://www.ucentral.edu.co/noticentral/plantas-tratamiento-aguas-residuales-del-rio-bogota-generan-gases-efecto-invernadero>
- Carreño Sayago, U. F., Perez, J. J., Cote Montañez, D., & Agatón, A. L. (2016). Modelación de un sistema de lodos activados en el sector de las curtiembres de San Benito Bogotá. *Producción + Limpia*, 11(2), 9–21. <https://doi.org/10.22507/pml.v11n2a1>
- Chávez Andrade, J. K. (2018). *Recuperación de cromo a partir de lodos residuales provenientes del proceso de curtido en la industria de la curtiembre* [Universidad Central del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/17033/1/T-UCE->



0017-IQU-019.pdf

- Chen, G., Feng, J., Wang, W., Yin, Y., & Liu, H. (2017). Photocatalytic removal of hexavalent chromium by newly designed and highly reductive TiO<sub>2</sub> nanocrystals. *Water Research*, 108, 383–390. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.013>
- Chen, Q. Y., Murphy, A., Sun, H., & Costa, M. (2019). Molecular and epigenetic mechanisms of Cr(VI)-induced carcinogenesis. In *Toxicology and Applied Pharmacology* (Vol. 377, p. 114636). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2019.114636>
- Cristancho Montenegro, D. L., Pinto Hernández, L. M., & Tique Hilarión, J. S. (2019). Evaluación de la eficiencia de un sistema de electrocoagulación en los vertimientos de curtiembres en el sector de Villapinzón (Cundinamarca). *MUTIS*, 2, 34–48. <https://doi.org/10.21789/22561498.1590>
- De Gisi, S., Casella, P., Cellamare, C. M., Ferraris, M., Petta, L., & Notarnicola, M. (2017). Wastewater Reuse. In *Encyclopedia of Sustainable Technologies* (pp. 53–68). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10528-7>
- Ding, G. K. C. (2017). Wastewater Treatment and Reuse-The Future Source of Water Supply. In *Encyclopedia of Sustainable Technologies* (pp. 43–52). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10170-8>
- Documentación IDEAM*. (n.d.). Retrieved June 2, 2020, from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021318/03TextoCompleto.pdf>
- Dubey, S., Banerjee, S., Upadhyay, S. N., & Sharma, Y. C. (2017). Application of common nano-materials for removal of selected metallic species from water and wastewaters: A critical review. *Journal of Molecular Liquids*, 240, 656–677. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.05.107>
- Ealias, A. M., & P, S. M. (2017). A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application Related content Synthesis of Aluminium Nanoparticles in A. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 263(3). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/3/032019>
- EPA. (2016). *Chromium Compounds*. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-09/documents/chromium-compounds.pdf>
- EPA. (2020). *CLU-IN | Contaminants > Chromium VI > Chemistry and Behavior*. [https://clu-in.org/contaminantfocus/default.focus/sec/chromium\\_VI/cat/Chemistry\\_and\\_Behavior/](https://clu-in.org/contaminantfocus/default.focus/sec/chromium_VI/cat/Chemistry_and_Behavior/)
- Eskin, M. (2016). Chromium: Is It Essential and Is It Safe? *Vitam Miner*, 5. <https://doi.org/10.4172/2376-1318.1000e144>
- Estupiñan, K. (2018). *Curtiembres selladas en San Benito*. Alcaldía de Bogotá. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/curtiembres-selladas-en-san-benito>



- Ezzatahmadi, N., Ayoko, G. A., Millar, G. J., Speight, R., Yan, C., Li, J., Li, S., Zhu, J., & Xi, Y. (2017). Clay-supported nanoscale zero-valent iron composite materials for the remediation of contaminated aqueous solutions: A review. In *Chemical Engineering Journal* (Vol. 312, pp. 336–350). Elsevier B.V.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.154>
- Ferroudj, N., Nzimoto, J., Davidson, A., Talbot, D., Briot, E., Dupuis, V., Bée, A., Medjram, M. S., & Abramson, S. (2013). Maghemite nanoparticles and maghemite/silica nanocomposite microspheres as magnetic Fenton catalysts for the removal of water pollutants. *Applied Catalysis B: Environmental*, 136–137, 9–18.  
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.01.046>
- Franco González, N. G., Clavijo Rios, C., Niño García, S. L., & Salazar Neira, J. C. (2017). *Boletín del índice de calidad del agua en corrientes superficiales “ica” 2017 - ii*.  
<https://www.car.gov.co/uploads/files/5ada16a46c9f6.pdf>
- Fu, F., Ma, J., Xie, L., Tang, B., Han, W., & Lin, S. (2013). Chromium removal using resin supported nanoscale zero-valent iron. *Journal of Environmental Management*, 128, 822–827. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.044>
- García Muñoz, O. E., & Ramirez Rodriguez, L. N. (2019). *Evaluación de una propuesta para el sistema de tratamiento de aguas residuales de curtiembre y marroquinería f.b* [Fundación Universidad de America].  
<http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7378/1/6132093-2019-1-IQ.pdf>
- Gomez, S. (2016). *Características tecnológicas del cuero napa de ovino adulto, mediante los metodos de curtido wet- blue y wet*. 132.
- González Pachón, L. A. (2019). *Gestión para mitigar los impactos ambientales generados por las curtiembres de bogotá con el fin de concientizar sobre el cambio climático* [Universidad Militar Nueva Granada].  
<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/21130/GonzalezPachonLuzAngelica2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- GracePavithra, K., Jaikumar, V., Kumar, P. S., & SundarRajan, P. S. (2019). A review on cleaner strategies for chromium industrial wastewater: Present research and future perspective. *Journal of Cleaner Production*, 228, 580–593.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.117>
- Hasan, S. (2015). A Review on Nanoparticles: Their Synthesis and Types. In *Research Journal of Recent Sciences* (Vol. 4). [www.isca.me](http://www.isca.me)
- Hernandez, E. (2018). *Criterios de Implementación ISO 14001: 2015. Caso de estudio Sector Curtiembres*.  
<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/19108/80245223.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hossain, M., Hossain, M., Begum, M., Shahjahan, M., Islam, M., & Saha, B. (2018). Magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticles for chromium removal. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, 53(3), 219–224.

<https://doi.org/10.3329/bjsir.v53i3.38269>

- Islam, J. B., Furukawa, M., Tateishi, I., Katsumata, H., & Kaneco, S. (2019). Photocatalytic Reduction of Hexavalent Chromium with Nanosized TiO<sub>2</sub> in Presence of Formic Acid. *ChemEngineering*, 3(2), 33. <https://doi.org/10.3390/chemengineering3020033>
- Jin, W., Du, H., Zheng, S., & Zhang, Y. (2016). Electrochemical processes for the environmental remediation of toxic Cr(VI): A review. *Electrochimica Acta*, 191, 1044–1055. <https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2016.01.130>
- Justin, C., Philip, S. A., & Samrot, A. V. (2017). Synthesis and characterization of superparamagnetic iron-oxide nanoparticles (SPIONs) and utilization of SPIONs in X-ray imaging. *Applied Nanoscience (Switzerland)*, 7(7), 463–475. <https://doi.org/10.1007/s13204-017-0583-x>
- Kahrizi, H., Bafkar, A., & Farasati, M. (2016). Effect of nanotechnology on heavy metal removal from aqueous solution. *Journal of Central South University*, 23(10), 2526–2535. <https://doi.org/10.1007/s11771-016-3313-8>
- Kalidhasan, S., Santhana Krishna Kumar, A., Rajesh, V., & Rajesh, N. (2016). The journey traversed in the remediation of hexavalent chromium and the road ahead toward greener alternatives-A perspective. In *Coordination Chemistry Reviews* (Vol. 317, pp. 157–166). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2016.03.004>
- Kamegawa, T., Ishiguro, Y., Magatani, Y., & Yamashita, H. (2016). Spherical TiO<sub>2</sub>/Mesoporous SiO<sub>2</sub> core/shell type photocatalyst for water purification. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 16(9), 9273–9277. <https://doi.org/10.1166/jnn.2016.12894>
- Kan, C. C., Ibe, A. H., Rivera, K. K. P., Arazo, R. O., & de Luna, M. D. G. (2017). Hexavalent chromium removal from aqueous solution by adsorbents synthesized from groundwater treatment residuals. *Sustainable Environment Research*, 27(4), 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.04.001>
- Kaushal, A., & Singh, S. K. (2017). Removal of heavy metals by nanoadsorbents: A review. *Journal of Environment and Biotechnology Research*. [www.vinanie.com/jebr](http://www.vinanie.com/jebr)
- Kazemi, M., Jahanshahi, M., & Peyravi, M. (2018). Hexavalent chromium removal by multilayer membrane assisted by photocatalytic couple nanoparticle from both permeate and retentate. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.09.059>
- Khan, F. S. A., Mubarak, N. M., Khalid, M., Walvekar, R., Abdullah, E. C., Mazari, S. A., Nizamuddin, S., & Karri, R. R. (2020). Magnetic nanoadsorbents' potential route for heavy metals removal—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(19), 24342–24356. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08711-6>
- Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. In *Arabian Journal of Chemistry* (Vol. 12, Issue 7, pp. 908–931). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>

- Koei, N. (2011). *Car alternativas para el manejo y disposicion de biosolidos Producto Final-Anexo No. 20 Alternativas para el Manejo y Disposición de Biosólidos de la PTAR Salitre.*
- Lakherwal, D. (2014). Adsorption of Heavy Metals: A Review. In *International Journal of Environmental Research and Development* (Vol. 4, Issue 1). <http://www.ripublication.com/ijerd.htm>
- Latorre Torres, D. F. (2014). *Diagnóstico ambiental y programa de control y seguimiento al sector curtientes del barrio San Benito de la ciudad de Bogotá* [Universidad de La Salle]. [https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1010&context=maest\\_ingenieria](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1010&context=maest_ingenieria)
- Lim, J. Y., Mubarak, N. M., Abdullah, E. C., Nizamuddin, S., Khalid, M., & Inamuddin. (2018). Recent trends in the synthesis of graphene and graphene oxide based nanomaterials for removal of heavy metals — A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 66, 29–44. <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2018.05.028>
- Lisjak, D., & Mertelj, A. (2018). Anisotropic magnetic nanoparticles: A review of their properties, syntheses and potential applications. In *Progress in Materials Science* (Vol. 95, pp. 286–328). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.03.003>
- Liu, L., Luo, X.-B., Ding, L., & Luo, S.-L. (2019). Application of Nanotechnology in the Removal of Heavy Metal From Water. In *Nanomaterials for the Removal of Pollutants and Resource Reutilization*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814837-2.00004-4>
- Maitlo, H. A., Kim, K. H., Kumar, V., Kim, S., & Park, J. W. (2019). Nanomaterials-based treatment options for chromium in aqueous environments. In *Environment International* (Vol. 130, p. 104748). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.020>
- Marín, J. (2019). *RÍO BOGOTÁ: Donde nace, su historia, recorrido y más.* <https://conocelosrios.com/c-colombia/rio-bogota/>
- Martinez Buitrago, S. Y., & Romero Coca, J. A. (2018). Revisión del estado actual de la industria de las curtientes en sus procesos y productos: un análisis de su competitividad. *Revista Facultad de Ciencias Económicas*, 26(1), 113–124. <https://doi.org/10.18359/rfce.2357>
- Miguel Córdova Bravo, H., Vargas Parker, R., Téllez Monzón, L., Flor Cesare Coral, M., Becker, R., & Visitación Figueroa, L. (2013). Influencia del uso de acomplejantes en el baño de curtido sobre la calidad final del cuero. In *Rev Soc Quím Perú* (Vol. 79, Issue 4). [www.tanquimica.com.br](http://www.tanquimica.com.br),
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 631 de 2015 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.* <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=70346&dt=S>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Resolución N° 0883 de 2018.*

- Mitra, S., Sarkar, A., & Sen, S. (2017). Removal of chromium from industrial effluents using nanotechnology: a review. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 2(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s41204-017-0022-y>
- Mnif, A., Bejaoui, I., Mouelhi, M., & Hamrouni, B. (2017). Hexavalent Chromium Removal from Model Water and Car Shock Absorber Factory Effluent by Nanofiltration and Reverse Osmosis Membrane. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/7415708>
- Nam, A., Choi, U. S., Yun, S. T., Choi, J. W., Park, J. A., & Lee, S. H. (2018). Evaluation of amine-functionalized acrylic ion exchange fiber for chromium(VI) removal using flow-through experiments modeling and real wastewater. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 66, 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.05.029>
- Nawaz, T., Zulfiqar, S., Sarwar, M. I., & Iqbal, M. (2020). Synthesis of diglycolic acid functionalized core-shell silica coated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanomaterials for magnetic extraction of Pb(II) and Cr(VI) ions. *Scientific Reports*, 10(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67168-2>
- Nematollahzadeh, A., Seraj, S., & Mirzayi, B. (2015). Catecholamine coated maghemite nanoparticles for the environmental remediation: Hexavalent chromium ions removal. *Chemical Engineering Journal*, 277, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.135>
- Nogueira, V., Lopes, I., Rocha-Santos, T., Gonçalves, F., & Pereira, R. (2015). Toxicity of solid residues resulting from wastewater treatment with nanomaterials. *Aquatic Toxicology*, 165, 172–178. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2015.05.021>
- Ojemaye, M. O., Okoh, O. O., & Okoh, A. I. (2017). Performance of NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> Magnetic Photocatalyst for the Effective Photocatalytic Reduction of Cr(VI) in Aqueous Solutions. *Journal of Nanomaterials*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/5264910>
- Okaiyeto, K., Nwodo, U. U., Okoli, S. A., Mabinya, L. V., & Okoh, A. I. (2016). Implications for public health demands alternatives to inorganic and synthetic flocculants: Bioflocculants as important candidates. In *MicrobiologyOpen* (Vol. 5, Issue 2, pp. 177–211). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/mbo3.334>
- Oliveira, H. (2012). Chromium as an Environmental Pollutant: Insights on Induced Plant Toxicity. *Journal of Botany*, 2012, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2012/375843>
- Ortiz, N. E., & Carmona, J. C. (2015). Aprovechamiento De Cromo Eliminado En Aguas Residuales De Curtiembres (San Benito, Bogotá), Mediante Tratamiento Con Sulfato De Sodio. *Revista Luna Azul*, 40(Enero-Junio), 117–126. <https://doi.org/10.17151/luaz.2015.40.9>
- Ortiz Penagos, N. E. (2013). *Recuperación Y Reutilización De Cromo De Las Aguas Residuales Del Proceso De Curtido De Curtiembres De San Benito (Bogotá), Mediante Un Proceso Sostenible Y Viable Tecnológicamente* [Universidad De Manizales]. [http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/1076/Ortiz\\_Penagos\\_Nidia\\_Elena\\_2013.pdf?sequence=1](http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/1076/Ortiz_Penagos_Nidia_Elena_2013.pdf?sequence=1)

- Pakade, V. E., Tavengwa, N. T., & Madikizela, L. M. (2019). Recent advances in hexavalent chromium removal from aqueous solutions by adsorptive methods. In *RSC Advances* (Vol. 9, Issue 45, pp. 26142–26164). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c9ra05188k>
- Panda, H., Tiadi, N., Mohanty, M., & Mohanty, C. R. (2017). Studies on adsorption behavior of an industrial waste for removal of chromium from aqueous solution. *South African Journal of Chemical Engineering*, 23, 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2017.05.002>
- Paul, M. L., Samuel, J., Roy, R., Chandrasekaran, N., & Mukherjee, A. (2015a). Studies on Cr(VI) removal from aqueous solutions by nanotitania under visible light and dark conditions. *Bulletin of Materials Science*, 38(2), 393–400. <https://doi.org/10.1007/s12034-015-0879-y>
- Paul, M. L., Samuel, J., Roy, R., Chandrasekaran, N., & Mukherjee, A. (2015b). Studies on Cr(VI) removal from aqueous solutions by nanotitania under visible light and dark conditions. *Bulletin of Materials Science*, 38(2), 393–400. <https://doi.org/10.1007/s12034-015-0879-y>
- Peng, H., & Guo, J. (2020). Removal of chromium from wastewater by membrane filtration, chemical precipitation, ion exchange, adsorption electrocoagulation, electrochemical reduction, electrodialysis, electrodeionization, photocatalysis and nanotechnology: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 1, p. 3). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01058-x>
- Peng, H., Guo, J., Li, B., Liu, Z., & Tao, C. (2018). High-efficient recovery of chromium (VI) with lead sulfate. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 85, 149–154. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.01.028>
- Peng, H., Leng, Y., & Guo, J. (2019). Electrochemical Removal of Chromium (VI) from Wastewater. *Applied Sciences*, 9(6), 1156. <https://doi.org/10.3390/app9061156>
- Pinilla Arbeláez, D. E. (2014). *PRECIPITACIÓN DE CROMO Y REUTILIZACIÓN DEL AGUA DE VERTIMIENTOS DE CURTIEMBRES DE SAN BENITO (BOGOTÁ)*. <http://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2647/2014danielpinilla.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Predescu, A., Matei, E., Predescu, A., Berbecaru, A., Sohaciu, M., & Predescu, C. (2016). *REMOVAL OF HEXAVALENT CHROMIUM FROM WATERS BY MEANS OF A TiO<sub>2</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> NANOCOMPOSITE* (Vol. 15, Issue 5). <http://omicron.ch.tuiasi.ro/EEMJ/>
- Rajput, S., Pittman, C. U., & Mohan, D. (2016a). Magnetic magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticle synthesis and applications for lead (Pb<sup>2+</sup>) and chromium (Cr<sup>6+</sup>) removal from water. *Journal of Colloid and Interface Science*, 468, 334–346. <https://doi.org/10.1016/J.JCIS.2015.12.008>
- Rajput, S., Pittman, C. U., & Mohan, D. (2016b). Magnetic magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticle synthesis and applications for lead (Pb<sup>2+</sup>) and chromium (Cr<sup>6+</sup>) removal from water. *Journal of Colloid and Interface Science*, 468, 334–346. <https://doi.org/10.1016/J.JCIS.2015.12.008>



- Ray, P. Z., & Shipley, H. J. (2015). Inorganic nano-adsorbents for the removal of heavy metals and arsenic: A review. *RSC Advances*, 5(38), 29885–29907. <https://doi.org/10.1039/c5ra02714d>
- Religa, P., Kowalik, A., & Gierycz, P. (2011). Application of nanofiltration for chromium concentration in the tannery wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 186(1), 288–292. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.10.112>
- Salgot, M., & Folch, M. (2018). Wastewater treatment and water reuse. In *Current Opinion in Environmental Science and Health* (Vol. 2, pp. 64–74). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.03.005>
- Salman, R. H., Hassan, H. A., Abed, K. M., Al-Alawy, A. F., Tuama, D. A., Hussein, K. M., & Jabir, H. A. (2020). Removal of chromium ions from a real wastewater of leather industry using electrocoagulation and reverse osmosis processes. *AIP Conference Proceedings*, 2213, 020186. <https://doi.org/10.1063/5.0000201>
- Samrot, A. V., Sahithya, C. S., Jenifer Selvarani, A., Pachiyappan, S., & Suresh Kumar, S. U. (2019). Surface-engineered super-paramagnetic iron oxide nanoparticles for chromium removal. *International Journal of Nanomedicine*, 14, 8105–8119. <https://doi.org/10.2147/IJN.S214236>
- Saxena, G., Chandra, R., & Bharagava, R. N. (2017). Environmental pollution, toxicity profile and treatment approaches for tannery wastewater and its chemical pollutants. In *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* (Vol. 240, pp. 31–69). Springer New York LLC. [https://doi.org/10.1007/398\\_2015\\_5009](https://doi.org/10.1007/398_2015_5009)
- Secretaría Distrital de Ambiente Alcaldía de Bogotá. (n.d.). *GUÍA CONCEPTUAL SOBRE LA PTAR SALITRE*. Retrieved June 2, 2020, from <http://www.secretariadeambiente.gov.co/sda/libreria/pdf/riobogota/crono.pdf>
- Shahid, M., Shamshad, S., Rafiq, M., Khalid, S., Bibi, I., Niazi, N. K., Dumat, C., & Rashid, M. I. (2017). Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system: A review. In *Chemosphere* (Vol. 178, pp. 513–533). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.074>
- Shi, D., Zhang, X., Wang, J., & Fan, J. (2018). Highly reactive and stable nanoscale zero-valent iron prepared within vesicles and its high-performance removal of water pollutants. *Applied Catalysis B: Environmental*, 221, 610–617. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.09.057>
- Sierra Garcia, S. C. (2018). *Environmental Effects Generated By The Discharges Of The Leather Tanning Industries: Implications In The High Basin Of The Bogotá River*. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/17868/SierraGarciaSoniaCarolina2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Simeonidis, K., Kaprara, E., Samaras, T., Angelakeris, M., Pliatsikas, N., Vourlias, G., Mitrakas, M., & Andritsos, N. (2015). Optimizing magnetic nanoparticles for drinking water technology: The case of Cr(VI). *Science of the Total Environment*, 535, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.033>

- Sobhanardakani, S., & Zandipak, R. (2017). Synthesis and application of TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles as novel adsorbent for removal of Cd(II), Hg(II) and Ni(II) ions from water samples. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(7), 1913–1925. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1374-5>
- Thanh Ho, V. T., Hong, N. V. H., Van Nguyen, A., Bach, L. G., & Dinh, T. P. (2018). Core–Shell Fe@SiO<sub>2</sub> Nanoparticles Synthesized via Modified Stober Method for High Activity in Cr(VI) Reduction. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 18(10), 6867–6872. <https://doi.org/10.1166/jnn.2018.15721>
- Thekkudan, V. N., Vaidyanathan, V. K., Ponnusamy, S. K., Charles, C., Sundar, S. L., Vishnu, D., Anbalagan, S., Vaithyanathan, V. K., & Subramanian, S. (2017). Review on nanoadsorbents: A solution for heavy metal removal from wastewater. In *IET Nanobiotechnology* (Vol. 11, Issue 3, pp. 213–224). Institution of Engineering and Technology. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2015.0114>
- Vásquez Daza, L. (2012). *Las curtiembres en el Barrio San Benito de Bogotá. Un análisis bioético en la perspectiva de Hans Jonas*. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/2144>
- Wang, F., Yang, W., Zheng, F., & Sun, Y. (2018). Removal of Cr (VI) from Simulated and Leachate Wastewaters by Bentonite-Supported Zero-Valent Iron Nanoparticles. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(10), 2162. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102162>
- Wang, X., Liu, X., Xiao, C., Zhao, H., Zhang, M., Zheng, N., Kong, W., Zhang, L., Yuan, H., Zhang, L., & Lu, J. (2020). Triethylenetetramine-modified hollow Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/chitosan magnetic nanocomposites for removal of Cr(VI) ions with high adsorption capacity and rapid rate. *Microporous and Mesoporous Materials*, 297, 110041. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110041>
- Wu, J., Yan, M., Lv, S., Yin, W., Bu, H., Liu, L., Li, P., Deng, H., & Zheng, X. (2021). Preparation of highly dispersive and antioxidative nano zero-valent iron for the removal of hexavalent chromium. *Chemosphere*, 262, 127733. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127733>
- Yang, J., Hou, B., Wang, J., Tian, B., Bi, J., Wang, N., Li, X., & Huang, X. (2019). Nanomaterials for the Removal of Heavy Metals from Wastewater. *Nanomaterials*, 9(3), 424. <https://doi.org/10.3390/nano9030424>
- Yao, S., Yuan, X., Jiang, L., Xiong, T., & Zhang, J. (2020). *Recent Progress on Fullerene-Based Materials* :
- Zeng, Q., Huang, Y., Huang, L., Hu, L., Xiong, D., Zhong, H., & He, Z. (2020). Efficient removal of hexavalent chromium in a wide pH range by composite of SiO<sub>2</sub> supported nano ferrous oxalate. *Chemical Engineering Journal*, 383, 123209. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123209>
- Zhao, Y., Kang, D., Chen, Z., Zhan, J., & Wu, X. (2018). Removal of Chromium Using Electrochemical Approaches: A Review. *Int. J. Electrochem. Sci*, 13, 1250–1259. <https://doi.org/10.20964/2018.02.46>

Zhou, L., Li, R., Zhang, G., Wang, D., Cai, D., & Wu, Z. (2018). Zero-valent iron nanoparticles supported by functionalized waste rock wool for efficient removal of hexavalent chromium. *Chemical Engineering Journal*, 339, 85–96.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.132>