

7 INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos más importantes e indispensables para la vida. Los seres humanos somos totalmente dependientes de este recurso. Por ello es que debemos ser responsables para mantener dicho recurso apto para su consumo sin impedir su ciclo natural. El planeta está cubierto por aproximadamente 70 por ciento de agua, del cual podemos considerar que menos del 2.5 por ciento es agua dulce, pero desafortunadamente este pequeño porcentaje de agua consumible no está distribuida de manera equitativa en todo el mundo (Mohamed, 2009) o aun peor, está siendo contaminada. Entre los contaminantes que generan mayor preocupación están los metales pesados por su gran dificultad para removerlos y por su alta toxicidad.

Es bien sabido que el agua contiene y transporta impurezas, es decir que trae consigo minerales, iones, moléculas orgánicas, bacterias, entre otras muchas otras sustancias, que en muchos casos son inofensivas para el medio ambiente y para los seres vivos a concentraciones discretas, ya que incluso los seres vivos requieren de la ingestión de algunos minerales en cantidades traza para lograr satisfacer sus necesidades metabólicas. Algunos de estos minerales están compuestos por metales pesados, y a pesar de ello, son esenciales para la vida en concentraciones pequeñas, como es el caso para el vanadio, magnesio, cobre, zinc, selenio, hierro, cobalto, molibdeno, entre otros (Velázquez Monroy & Ordorica Vargas, 2009).

Un metal pesado se puede definir como cualquier elemento metálico que tiene una alta densidad el cual además es toxico y nocivo para la salud a bajas concentraciones (Neeti & Prakash, 2013). Por consiguiente, cualquier metal pesado es considerado un contaminante

si se encuentra donde no es deseado o que conlleve a un efecto contraproducente a los seres vivos y al medio ambiente (Singh, Gautam, Mishra, & Gupta, 2011).

Los metales pesados tienen graves efectos en la salud humana por el consumo de aguas contaminadas con estos metales, así mismo, estos pueden llegar a bioacumularse en los tejidos de plantas y de otros organismos vivos de modo que interrumpe su ciclo vital y resulta ser nocivo para la salud. Muchos organismos acuáticos por ejemplo como los bígamos, bioacumulan y biomagnifican estos contaminantes; la ingestión de los metales pesados no solo afecta la productividad y la capacidad de reproducirse de estos organismos, ya que a su vez afectan a otros seres vivos que dependen de ellos por ser su fuente de alimento (Davies, Allison, & Uyi, 2006). La contaminación de metales pesados provocada por cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel y arsénico es de las que mas repercute a la salud humana puesto a que concentraciones muy bajas provocaran enfermedades y malestares en la salud humana a tal grado que pueden llegar a ser letales (Lo, Wang, Tsai, & Lin, 2012).

Los metales pesados tienen distintos efectos en la salud humana, en la fauna y en el medio ambiente dependiendo de varios factores como la especiación o estado químico en que se encuentran, la concentración y el tiempo de residencia en un organismo, entre otros (Ahmed et al., 2015).

Por otra parte, existen algunos compuestos de metales pesados que tienen diversas funciones biológicas esenciales para el funcionamiento normal del organismo. Por consecuencia muchas reacciones bioquímicas dependen de iones metálicos que pueden estar en complejos de coordinación. A pesar de que en muchos casos estos iones son esenciales para las funciones vitales de los organismos, siendo que en ocasiones, el papel que juegan dentro de los organismos aun es dudoso (Miessler, Fischer, & Tarr, 2014), a excepción de algunos como lo son el $\text{Fe}^{2+/3+}$, $\text{Cu}^{1+/2+/3+}$, $\text{Co}^{2+/3+}$, Co^{2+} , Zn^{2+} , $\text{Mo}^{2+/4+/6+}$, $\text{W}^{2+/4+/6+}$ y algunos

otros, que cumplen funciones dentro de los procesos enzimáticos, transporte y almacenamiento de proteínas entre otras. Una deficiencia en algunos metales o compuestos inorgánicos pueden ser causa de algunas enfermedades como la pérdida de apetito, deficiencia en los sentidos del olfato y gusto, y la baja velocidad de recuperación de heridas cuando existe una deficiencia de zinc (Ahmed et al., 2015). Sin embargo, a pesar de que algunos de estos elementos son esenciales para la vida, en exceso pueden provocar daños a la salud.

Por estas razones, se han desarrollado métodos para la remoción de metales pesados, entre los cuales, los más conocidos son técnicas de tratamientos electroquímicos precipitación química (Meunier et al., 2006), adsorción, intercambio iónico, osmosis inversa, agentes quelantes específicos, filtraciones por membrana, evaporación, flotación, oxidación (Carlos, Garcia Einschlag, C., & O., 2013), y biosorción (Kelly-Vargas, Cerro-Lopez, Reyna-Tellez, Bandala, & Sanchez-Salas, 2012). De estas técnicas, una de las más atractivas es la adsorción, y uno de los materiales de gran interés actual para este propósito son las nanopartículas de magnetita (Liu, Zhao, & Jiang, 2008).

Nanopartículas magnéticas han sido estudiadas para su aplicación en un amplio rango de áreas, como usos médicos (Ito, Shinkai, Honda, & Kobayashi, 2005), transporte de medicamentos, para diagnósticos como en imagenología de RMN (Roca et al., 2009), almacenamiento de información, catálisis homogénea (Stevens, Fan, Gardimalla, Yen, & Gao, 2005), y para propósitos ambientales, tales como remoción de metales pesados de agua contaminada (Shen et al., 2009).

El interés que se genera en torno a las nanopartículas magnéticas surge de sus propiedades exclusivas de magnetismo, tales como su coercitividad, baja temperatura de Curie, alta susceptibilidad magnética (Goya, Berquó, Fonseca, & Morales, 2003), entre otras.

Nanopartículas de magnetita funcionalizadas con biopolímeros han atraído un gran interés para la remoción de metales pesados del agua porque se ha encontrado que dichas nanopartículas funcionalizadas con almidón son capaces de remover Ni^{2+} , Cu^{2+} , y Pb^{2+} (Abdul-Raheim M. Abdul-Raheim, El-Saeed Shima M., Farag Reem K., 2016).

El almidón comúnmente contiene principalmente amilosa y amilopectina en una proporción de 20% a 30% de amilosa y 70% a 80% de amilopectina (Schirmer, Höchstötter, Jekle, Arendt, & Becker, 2013). La pregunta que surge de manera inmediata es si ¿alguno de éstos, como la amilopectina, al ser funcionalizado a nanopartículas magnéticas (magnetita), puede generar un sistema adsorbente de metales pesados?

7.1 ANTECEDENTES

7.1.1 TOXICIDAD Y ORIGEN DE LOS METALES PESADOS

7.1.1.1 Cadmio

El cadmio (grupo IIB de la tabla periódica de elementos) es un metal pesado que presenta graves riesgos para la salud humana. Se encuentra en la naturaleza comúnmente en estado de oxidación 2+ (WHO, 2011), sin descartar que también se llega a encontrar en estados de oxidación 1+, en formas minerales (Tucker, 2011) en conjunto con zinc, cobre y plomo (Godt et al., 2006). La actividad volcánica tanto en la tierra como en aguas profundas, son actividades naturales que ocasionan un aumento temporal de las concentraciones ambientales de cadmio (WHO, 2010). Además, este elemento es utilizado en diversos procesos industriales, por ejemplo: como agente anticorrosivo, en la fabricación de baterías de níquel-cadmio, como estabilizador de productos de PVC, como pigmento de color, etc. (Godt et al., 2006).

Otras actividades humanas también causantes del incremento de Cd en el ambiente son el uso de fertilizantes de fosfato (que contienen una cantidad significativa del metal), el consumo de tabaco, la combustión de combustibles fósiles (WHO, 2010). Una gran parte de la contaminación general de Cd es causada por el vertido e incineración de desechos de baterías y plásticos que contienen Cd (Godt et al., 2006).

El agua subterránea rara vez contiene altos niveles de cadmio a menos que esté contaminada por minería, aguas residuales industriales o filtraciones de sitios de desechos peligrosos (Tucker, 2011). Las impurezas de cinc en tuberías galvanizadas, calentadores de agua, enfriadores de agua y grifos también pueden conducir a un aumento de los niveles de cadmio en el agua potable (WHO, 2010).

Toxicidad del Cd

El cadmio es un metal pesado demasiado tóxico puesto que tiende a acumularse en diversos órganos del cuerpo (Ahrubesh et al., 2015). Básicamente existen tres formas posibles de reabsorción de cadmio: vía gastrointestinal, pulmonar y dérmica (Godt et al., 2006). De acuerdo a la OMS, el órgano principalmente afectado es el riñón, ya que se acumula en las células de este órgano y tiene una vida media en los humanos de 10-30 años (Kumar, Chawla, & Kaur, 2015). Dicha acumulación puede generar una disfunción tubular renal provocando la excreción de proteínas de alto peso molecular, siendo este padecimiento, por lo general, irreversible. La toxicidad del cadmio también está asociada a problemas pulmonares, gastrointestinales, hepáticos, esqueléticos, reproductivos y cardiovasculares (Zhai, Narbad, & Chen, 2015), pudiendo ocasionar hipertensión, diabetes, cálculos urinarios, daños en los huesos y dientes ya que puede reemplazar al calcio (Kumar et al., 2015) alargando su estancia en el organismo.

Muchas agencias de salud han establecido estándares de exposición diseñados para proteger al público en general de la exposición excesiva al cadmio de varias fuentes (Tucker, 2011). La *Food and Drug Administration* (FDA), designa un límite máximo de cadmio en el agua para beber de 0.005 mg/mL (Tucker, 2011), sin embargo, la Organización Mundial de la Salud (OMS), sugiere que la máxima concentración permitida de cadmio en agua para beber debería ser de 0.003mg/L (Ahribesh et al., 2015).

Este metal aparte de no ser esencial para los humanos también ha sido clasificado como un potencial cancerígeno humano por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (Zhai et al., 2015), por lo que, si las concentraciones de cadmio en el agua aumentan, las probabilidades a que los humanos desarrollen algún tipo de cáncer también se incrementará.

Tratamiento

Para tratar a personas que padecen de envenenamiento por cadmio, se implementa el uso de quelantes como el CaNa_2EDTA y el DMSA (ácido meso-2,3-dimercaptosuccinico), pero desafortunadamente se ha encontrado que el CaNa_2EDTA puede causar daños por ser tóxicos al sistema renal, en especial cuando se utiliza por periodos prolongados y en dosis altas (arriba de 75 mg/kg) (Zhai et al., 2015), por lo que es preferible tratar de prevenir este tipo de envenenamientos desde un principio.

7.1.1.2 Cromo

El cromo es uno de los elementos más abundantes de la corteza terrestre (Sazakli et al., 2014), a pesar de su variedad de estados de oxidación posibles, es más común encontrar al cromo en el medio ambiente como trivalente (Cr^{3+}) y hexavalente (Cr^{6+}) (Hori, Shozugawa, & Matsuo, 2014). Este es un metal pesado distribuido ampliamente en la naturaleza,

encontrándose en rocas, suelo, agua y en una gran diversidad de alimentos como oligoelemento (Cr^{3+}); sin embargo, también puede estar presente como contaminante en los alimentos (Cr^{6+}) (Fundación Vasca para la Seguridad Agroalimentaria, 2014).

En el estado trivalente (Cr^{3+}), el cromo se encuentra de forma natural en una gran variedad de alimentos como carne, mariscos, huevo, cereales integrales, frutos secos, frutas y verduras, siendo esencial en pequeñas cantidades para el buen funcionamiento del organismo ya que es un potenciador de la acción de la insulina y ayuda en el metabolismo de los carbohidratos, lípidos y proteínas. Por ello, las dietas deficientes en cromo se asocian a enfermedades como la diabetes y a la aparición de problemas cardiovasculares (Fundación Vasca para la Seguridad Agroalimentaria, 2014).

Por otra parte, el cromo es un contaminante químico en su forma hexavalente (Cr^{6+}), que se transmite al ser humano a través del consumo de alimentos derivados de animales o vegetales con concentraciones de cromo transferido del suelo o del agua, así como por la propia ingesta de agua contaminada por este metal pesado (Fundación Vasca para la Seguridad Agroalimentaria, 2014). El Cr^{6+} se libera al medio ambiente debido a su uso en una gran diversidad de actividades industriales (Fundación Vasca para la Seguridad Agroalimentaria, 2014), como industrias de galvanoplastia (deposición de metales mediante electricidad), curtido de cuero, producción de textiles (ATDRS, 2012), y por combustión de combustibles fósiles (gas natural, petróleo y carbón), madera y papel (Fundación Vasca para la Seguridad Agroalimentaria, 2014).

Toxicidad del Cr

El estado de oxidación es la característica principal para determinar la toxicidad del metal: El Cr^{3+} presenta baja toxicidad oral porque su capacidad de absorción es muy baja y también presenta baja capacidad para permearse a través de la membrana celular (Fundación Vasca

para la Seguridad Agroalimentaria, 2014). En cambio, el cromo hexavalente (Cr^{6+}), en su forma de ion cromato (CrO_4^{2-}) tiene una mayor capacidad de permearse y penetrar la membrana celular a través de pasajes para aniones isoeléctricos e isoestructurales como lo son el SO_4^{2-} y el HPO_4^{2-} (Jaishankar, Tseten, Anbalagan, Mathew, & Beeregowda, 2014).

La mayor parte del Cr(VI) ingerido se reduce en el estómago a Cr(III), excretándose por vía urinaria en una semana, pero una mínima parte del Cr(VI) es capaz de atravesar las membranas celulares y puede permanecer en las células, tejidos y órganos durante años. A mediano-largo plazo, altas dosis de Cr(VI) puede provocar efectos graves neurológicos, hepáticos, renales, gastrointestinales, hematológicos, cardiovasculares y respiratorios, siendo los pulmones los principales órganos afectados (Fundación Vasca para la Seguridad Agroalimentaria, 2014).

Debido a sus propiedades mutagénicas, el Cr(VI) ha sido categorizado como un carcinógeno humano del grupo 1 por la Agencia Internacional de Investigación en Cáncer (Jaishankar et al., 2014) por su demostrable genotoxicidad y carcinogenicidad que afectan principalmente a los pulmones y senos nasales. Además, la genotoxicidad se ha visto evidenciada en varios estudios científicos donde la exposición a altas dosis de Cr(VI) ha provocado a mujeres embarazadas abortos, alteraciones en el desarrollo del esqueleto y sistema reproductivo del feto y bajo peso de nacimiento (Fundación Vasca para la Seguridad Agroalimentaria, 2014).

La Organización Mundial de Salud ha establecido que la dosis letal del Cr(VI) es de 50 a 70 mg/kg (Hori et al., 2014). Organizaciones como la EPA y FDA han establecido los niveles de cromo aceptables en el agua potable y embotellada respectivamente. La EPA establece un nivel de contaminación máximo de 0.1 mg/L para la cantidad total de cromo en el

agua potable. Por otra parte, la FDA ha determinado que los niveles de cromo en el agua en botella no deben exceder de 0.1 mg/L (ATDRS, 2012).

Control y prevención

La reducción de Cr(VI) a Cr(III) es considerada como una estrategia efectiva y atractiva para la remediación de contaminación por cromo (Kang et al., 2014). Sin embargo, algunos iones intermedios que resultan de la reactividad del cromo pueden producir especies reactivas de oxígeno (ROS), que pueden reaccionar con el ADN (son genotóxicos) (Sazakli et al., 2014).

7.1.1.3 Mercurio

El mercurio (Hg) es un metal pesado que se encuentra distribuido en el planeta y proviene de diferentes fuentes artificiales y naturales (Valderas et al., 2013). Existen tres formas químicas principales del mercurio (ATSDR, 2011):

1. mercurio en su forma elemental o metálica (Hg^0): un líquido inoloro y brillante, de color plateado a blanco, que se convierte en un gas inoloro e inoloro cuando se calienta (Neeti & Prakash, 2013).
2. sales de mercurio inorgánico: Se encuentra presente en forma natural en la corteza de la tierra como sulfuro (Cinabrio- HgS) (Universidad de Buenos Aires, 2007).
3. mercurio orgánico: los compuestos orgánicos de mercurio son aquellos en que el mercurio está unido directamente a un átomo de carbono (Nordberg, 2012). El mercurio orgánico, en forma de metilmercurio en peces y mariscos, o de etilmercurio, es la forma más peligrosa para la salud humana (Valderas et al., 2013).

Las principales fuentes de contaminantes mercuriales han sido la actividad minera, residuos industriales de plantas cloro-alkali o de fabricación de vinilo y fungicidas, pinturas

antifúngicas, fotografía, pirotecnia, baterías secas y pilas, industrias papeleras y laboratorios médico-veterinarios y dentales (Valderas et al., 2013).

Las fuentes más comunes de mercurio son productos y procesos industriales, por ejemplo sales inorgánicas de mercurio, como lo son el cloruro de mercurio, óxido de mercurio, los cuales se han hallado en cosméticos para aclarar la piel y cremas anti-acné (Copan, Fowles, Barreau, & McGee, 2015). Otras fuentes del mercurio incluyen la quema de combustibles fósiles y biocombustibles, agroquímicos, pilas, producción de lámparas fluorescentes, producción de cementos y minería. Se ha descubierto que a pesar de que la actividad minera se haya detenido, las minas abandonadas generalmente siguen siendo un sitio de emisión de contaminantes a sistemas de agua (Méndez-Fernández, Rodríguez, & Martínez-Madrid, 2015), como acuíferos subterráneos, ríos, lagos, etc. La industria minera es probablemente una de las principales razones por la cual el mercurio es introducido al medio ambiente ya que se estima que por cada 1 kg de oro extraído, aproximadamente 1.32 kg de mercurio son liberados al medio ambiente, siendo 40% de éste en su estado líquido llegando a ríos, lagos, arroyos o sedimentos de agua, siendo el otro 60% del mercurio en estado gaseoso liberándose a la atmósfera (Ullah & Khan, 2014).

Se puede considerar como un elemento altamente tóxico a concentraciones muy bajas, a tal grado que organizaciones y países como Estados Unidos, China y la Organización Mundial de la Salud han puesto una concentración mínima para agua potable de consumo humano de 2.0, 1.0 y 1.0 $\mu\text{g/L}$ respectivamente (Xixin, L., Xiaoliu, H., Xiang, Z., Yaan, W., & Jun, M., 2015).

Toxicidad del Hg

El mercurio y sus compuestos son altamente tóxicos por los efectos que tienen sobre la salud humana, ecosistema y el metabolismo de microbios, puesto a que existen algunos microbios

que pueden crear compuesto como metilmercurio, el cual se bioacumulan y se biomagnifican a lo largo de la cadena alimenticia, en especial a través de los organismos acuáticos (Diao & Li, 2014).

Los efectos adversos por la exposición al mercurio dependen de la forma y ruta de exposición (ATSDR, 2011). La intoxicación por mercurio puede ocurrir al inhalar vapores de mercurio en el aire, comer alimentos contaminados (pescados o mariscos, siendo los pescados más grandes y de mayor edad los que tienden a tener mayores niveles de Hg debido a su bioacumulación en la cadena alimenticia), beber agua contaminada con mercurio y la practica medicinal que ocupe mercurio (Copan et al., 2015). La exposición a Hg puede ocasionar problemas principalmente respiratorios, cardiovasculares, renales, digestivos y del sistema nervioso. La exposición continua y repetida al mercurio puede resultar en la acumulación en el cuerpo y afectar principalmente al sistema nervioso central y a los riñones (ATSDR, 2011).

El envenenamiento por mercurio puede llevar a enfermedades conocidas como la “enfermedad rosa” o acrodinia, el síndrome de Hunter-Russel, y la enfermedad de Minamata (Roointan et al., 2015), ataxia, alteraciones sensoriales llevando al deterioro del cuerpo y finalmente la muerte. Así mismo, la inhalación del mercurio elemental puede causar síntomas como insomnio, pérdida de memoria, cambios neuromusculares, dolores de cabeza, problemas de la tiroides y riñones (Diao & Li, 2014). El metilmercurio por otro lado es uno de los compuestos organometálicos más comunes del mercurio y es bien conocida su actividad como neurotoxina ya que interrumpe el desarrollo del cerebro provocando malformación cefálica, al igual que es un cancerígeno potencial y provoca problemas cardiovasculares. Se puede decir que los efectos que tiene el mercurio sobre biomoléculas es lo que le da su alta toxicidad pues es capaz de enlazarse a grupos funcionales comunes en

biomoléculas como sulfhidrilos, fosfohidrilos, carboxilos, amidas, aminas y otros más que se encuentran en proteínas y enzimas lo cual provoca que estas precipiten, sean inhibidas y hayan acciones corrosivas (Rodrigues et al., 2013), de modo que también se han hallado iones mercurio en forma de compuesto de coordinación en forma de complejos con glutatión y cisteína en la sangre, cerebro, hígado y bilis (Ullah & Khan, 2014).

7.1.1.4 Plomo

El plomo es un metal tóxico distribuido de forma natural en la corteza terrestre. Su uso generalizado ha dado lugar en muchas partes del mundo a una importante contaminación del medio ambiente, un nivel considerable de exposición humana y graves problemas de salud pública (Sary & Mohammadi, 2012). Aproximadamente un 40 % del plomo se utiliza en forma metálica, un 25 % en aleaciones y un 35 % en compuestos químicos (Nordberg, 2012).

El plomo metálico tiene diversos usos industriales, por ejemplo, se utiliza en forma de planchas o tubos cuando se requiere una gran maleabilidad y resistencia a la corrosión, como en la industria química o en la construcción. También se utiliza para el revestimiento de cables, como componente de soldadura, como empaste en la industria automovilística y es un material excelente como protector de radiaciones ionizantes. Se utiliza en los procesos de metalizado para proporcionar recubrimientos protectores, en la fabricación de acumuladores y como baño de termotratamiento en el revenido de hilos metálicos. El plomo se encuentra en una gran variedad de aleaciones y sus compuestos se preparan y utilizan en grandes cantidades en numerosas industrias (Nordberg, 2012).

Las sales de plomo constituyen la base de muchas pinturas y pigmentos, por ejemplo, el carbonato y el sulfato de plomo se utilizan como pigmentos blancos y los cromatos de

plomo sirven para obtener amarillo, naranja, rojo y verde de cromo. El arseniato de plomo es un insecticida; el sulfato de plomo se utiliza en mezclas de caucho, etc (Nordberg, 2012).

El plomo puede ser ingerido por medio de alimentos preparados con agua que es transportada por tuberías de plomo o de plantas procesadoras que utilizan equipo o pintura en sus paredes que contiene una concentración considerable de plomo (Neeti & Prakash, 2013). También se ha registrado que el plomo se puede encontrar en la carne de res y de cerdo puesto a que tiene la característica de poderse bioacumular en el tejido de los animal y en las plantas, por lo que la concentración se va incrementando a lo largo de la cadena alimenticia (Lukáčová, Binkowski, & Golian, 2014) llegando así a los alimentos.

Toxicidad del Pb

La intoxicación y envenenamiento por plomo puede tener consecuencias sobre la salud devastadoras, en especial para niños, para lo cual se presentan aproximadamente 600 mil casos nuevos globalmente cada año que generan discapacidades intelectuales y mentales (Caravanos, Fuller, & Robinson, 2014). En el organismo humano, el plomo no se metaboliza, sino que se absorbe, se distribuye y se excreta directamente (Mason, Harp, & Han, 2014). Exposiciones crónicas a concentraciones muy bajas puede ocasionar que éste entre al torrente sanguíneo, resultando en efectos nocivos y dañinos para los riñones, hígado, sistema inmunológico, reproductivo, cardiovascular, nervioso y gastrointestinal, ya que es un veneno metabólico y una neurotoxina capaz de enlazarse a enzimas esenciales y otros componentes celulares activos a los cuales puede inactivar (Lukáčová et al., 2014) interrumpiendo su buen funcionamiento y afectando a la salud general del organismo. Algunos síntomas que se presentan por la intoxicación por plomo son: encefalopatía, dolor de cabeza, irritabilidad, deficiencia de atención, pérdida de memoria, alucinaciones, y en casos más graves provoca epilepsia, delirios, coma e incluso la muerte (Mason et al., 2014). Al ser introducido en el

torrente sanguíneo es excretado a través de las vías urinarias y a través del líquido biliar a una velocidad de 1 a 3 mL/min, con una vida media de aproximadamente 30 días, sin embargo, no todo es evacuado del cuerpo. Los restos de plomo que no son evacuados del cuerpo se unen a los glóbulos rojos, es distribuido a través de tejidos blandos del cuerpo y finalmente se acumula en los huesos donde permanecen por aproximadamente de 20 a 30 años (Mason et al., 2014).

7.1.2 GENERALIDADES

Tabla 1. Límite de metales pesados permitidos en el agua

Metal	LD ₅₀	Concentración mínima permitida (WHO, 2008)	Concentración mínima permitida (USEPA, 2002)
Cd(II)	60-5000 mg/kg	0.003 ppm	0.005 ppm
Cr(III)	185-615 mg/kg	0.050 ppm	0.100 ppm
Cr(VI)	20-250 mg/kg	0.050 ppm	0.100 ppm
Hg(II)	25-100 mg/kg	0.006 ppm	0.002 ppm
Pb(II)	450-630 mg/kg	0.010 ppm	0.000 ppm

7.1.3 NANOMATERIALES COMO ADSORBENTES

Los nanomateriales que se utilicen como adsorbentes de iones de metales pesados del agua, deben satisfacer los siguientes criterios:

- 1) El nanosorbente en sí no debe ser tóxico.
- 2) El adsorbente debe presentar una capacidad y selectividad relativamente alta a concentraciones bajas del contaminante.
- 3) Se debe poder remover el contaminante de la nanopartícula con facilidad.
- 4) Los adsorbentes deben poder ser reutilizados una infinidad de veces.

Hasta ahora, una gran variedad de nanomateriales se han reportado ser prometedores para la adsorción de metales pesados con una capacidad alta para adsorberlos (Wang et al., 2012),

tales como nanotubo de carbono, nanopartículas de óxidos metálicos, nanofibras con estructura *core/shell*, entre otros (Qu, Alvarez, & Li, 2013).

7.1.4 NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA (Fe₃O₄)

La magnetita es un mineral que presenta propiedades magnéticas y que existe de forma natural en la naturaleza; es un compuesto ferromagnético del grupo espinela que se encuentra comúnmente en sedimentos de rocas ígneas (Dey, 2012). Sin embargo, existen métodos para su obtención de manera sintética para el control de su tamaño (Sun & Zeng, 2002). Existen varios métodos para la síntesis de nanopartículas de magnetita por solución y mediante aerosol y métodos de vapor. Los métodos por solución incluyen: co-precipitación, microemulsión, polioles, descomposición de precursores a altas temperaturas, entre otras como procesos sonoquímicos y métodos electroquímicos; por otra parte, los métodos de aerosol y de vapor se refieren a: spray pirolisis y laser pirolisis (Dey, 2012).

De los métodos de síntesis de nanopartículas de magnetita previamente mencionados, el más sencillo de realizar es el método de co-precipitación, al igual que también es uno de los métodos más eficientes. Éste consiste en la precipitación de una mezcla de sales férricas y ferrosas en un medio acuoso, donde la precipitación se espera que se lleve a cabo a un nivel de pH entre 8 y 14, el cual a su vez, en conjunto con la fuerza iónica y la naturaleza de la sales, se puede modificar y controlar la morfología y el tamaño de las nanopartículas (Carlos et al., 2013), los cuales también llegan a ser dependientes del agente estabilizante (Zaitsev, Filimonov, Chu, Light, & Analysis, 1999).

Es de gran importancia que las nanopartículas de magnetita sean estabilizadas ya que son susceptibles a aglomerarse y oxidarse después de largos periodos de tiempo pasando de magnetita (Fe₃O₄) a maghemita (γ -Fe₂O₃) a temperatura ambiente, y a hematita (α -Fe₂O₃) a

temperaturas altas (Tang, Myers, Bosnick, & Brus, 2003). La manera en la que se ha resuelto el problema de la estabilidad es mediante la generación de nanopartículas *core/shell*, en la que se logra aislar el núcleo de la nanopartícula magnética del oxígeno y evitando que entre en contacto con otras partículas evitando su aglomeración. Una alternativa es funcionalizar las nanopartículas con algún polímero u en una matriz de sílica, o carbono para generar compósitos (Lu, Salabas, & Schüth, 2007).

La magnetita también ha generado interés como adsorbente de metales pesados, ya que se ha reportado que nanopartículas de magnetita funcionalizada con ácido húmico son capaces de adsorber Hg, Pb, Cd, y Cu (Liu et al., 2008), o estabilizadas con polietilenimina para remover Cr(VI) (Y. Pang et al., 2011). Existe una gran variedad de polímeros y biopolímeros con el potencial para servir como funcionalizantes de magnetita que pueden aportar a la adsorción de metales pesados, como lo es también el caso del almidón que también ha demostrado ser capaz de remover Cu(II), Pb(II), y Ni(II) (Abdul-Raheim M. Abdul-Raheim, El-Saeed Shima M., Farag Reem K., 2016).

7.1.5 AMILOPECTINA

El almidón está compuesto por dos estructuras moleculares: una estructura lineal, la cual se conoce como amilosa, y la otra estructura ramificada, conocida como amilopectina (Zhao, He, Wang, Wang, & Lin, 2009). La estructura de la amilopectina es bastante sencilla, compuesta de cadenas de grupos glucosídicos enlazados entre ellos por un enlace $\alpha(1\rightarrow4)$ y enlazados de una cadena a otra mediante enlaces $\alpha(1\rightarrow6)$ como se muestra en la Figura 1 (Myers, Morell, James, & Ball, 2000).

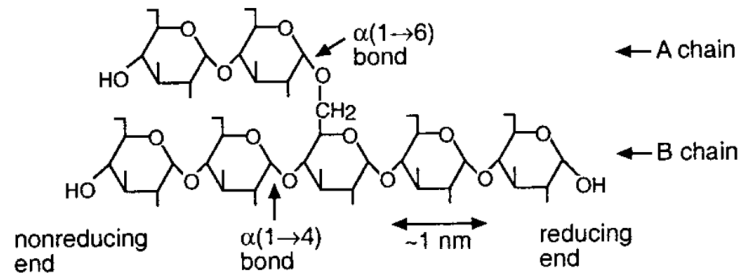


Figura 1. Estructura de Amilopectina (Myers et al., 2000)

Se ha encontrado que polisacáridos de almidón son capaces de formar complejos de coordinación de tipo Werner con iones metálicos debido a los grupos hidroxilo que actúan como sitios de coordinación (Ciesielski & Tomasik, 2003), siendo los complejos de coordinación resultantes generalmente especies cuadradas planas (Ciesielski & Tomasik, 2004). La geometría del complejo de coordinación es dependiente del ión metálico que se coordina, en otros casos, pueden ser de geometrías variadas, como bipiramidal, octaédrica, etc.