



Los nanomateriales y sus aplicaciones en la remediación ambiental

Nanomaterials and their applications in environmental remediation

Nanomateriais e suas aplicações na remediação ambiental

Johnny Marlon Borja-Borja^I
jhonny.borja@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/000-0002-3708-0126>

Sandra Fabiola Heredia-Moyano^{II}
sandra.heredia@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-3668-1269>

Miguel Ángel Sáez-Paguay^{III}
miguel.saez@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-8389-258X>

Correspondencia: jhonny.borja@esPOCH.edu.ec

Ciencias técnicas y aplicadas
Artículo de investigación

***Recibido:** 16 de mayo de 2020 ***Aceptado:** 15 de junio de 2020 * **Publicado:** 22 de julio de 2020

- I. Maestría en Ingeniería Química, Ingeniero Químico, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador
- II. Maestría en Química, Ingeniera Química, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador
- III. Máster Universitario en Física: Radiaciones, Nanotecnología, Partículas y Astrofísica, Biofísico, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba, Ecuador.

Resumen

La contaminación del agua (superficial y subterránea), el suelo, el aire, por materia orgánica, materia inorgánica como por ejemplo metales pesados (Hg, Cd, Cr, Pb, etc.) han despertado el interés científico desde décadas atrás, debido a que los focos de contaminación se incrementan a medida que las industrias y la población crece, desestabilizando el equilibrio medioambiental influyendo de manera negativa en la cadena trófica.

Debido a estas consideraciones el presente trabajo tiene la finalidad de investigar a través de la metodología de revisión bibliográfica sobre las generalidades de la nanotecnología y los nanomateriales, los métodos a través de los cuales es posible sintetizarlos en el laboratorio (Como son síntesis de combustión, deposición electroquímica, polimerización química, síntesis hidrotermal, Carbón vapour deposition, deposición sol-gel), sus aplicaciones e importancia dentro de los procesos de remediación ambiental con énfasis en la eliminación de metales pesados, ya que son contaminantes que suelen persistir durante largos periodos de tiempo en el agua, suelo, aire, provocando daños medioambientales en la mayoría irreversibles. Los metales pesados al encontrarse en grandes concentraciones en estos medios suelen ser absorbidos por plantas y animales e incluso el ser humano al estar dentro de la cadena trófica, alojándose en su sistema y provocando efectos negativos en la salud. Los nanomateriales más comunes utilizados en la eliminación o mitigación de estos metales pesados a través de la adsorción e inmovilización, de reacciones ácido/base o redox, son aquellos que contienen el hierro como componente principal en sus estructuras, como, por ejemplo, el hierro cero-Valente, Sulfuro de Hierro, Fosfato de hierro conocidos comúnmente como Ferreritas, que debido a sus características y propiedades han tenido un éxito rotundo en el ámbito medioambiental

Palabras claves: Nanotecnología; nanopartículas; nanomateriales; nanotubos; carboximetilcelulosa; óxido de hierro; óxido de titanio.

Abstract

The contamination of water (surface and ground), soil, air, by organic matter, inorganic matter such as heavy metals (Hg, Cd, Cr, Pb, etc.) have aroused scientific interest since decades ago, due to that sources of contamination increase as industries and populations grow, destabilizing the environmental balance, negatively influencing the food chain.

Due to these considerations, the present work has the purpose of investigating through the bibliographic review methodology on the generalities of nanotechnology and nanomaterials, the methods through which it is possible to synthesize them in the laboratory (As they are combustion synthesis, electrochemical deposition, chemical polymerization, hydrothermal synthesis, Carbon vapor deposition, sol-gel deposition), their applications and importance within environmental remediation processes with emphasis on the removal of heavy metals, since they are pollutants that usually persist for long periods of time in water, soil, air, causing environmental damage, most of which are irreversible. Heavy metals, when found in high concentrations in these media, are usually absorbed by plants and animals, and even humans by being within the food chain, lodging in their system and causing negative health effects. The most common nanomaterials used in the elimination or mitigation of these heavy metals through absorption and immobilization, of acid/base or redox reactions, are those that contain iron as the main component in their structures, such as iron Zero-valent, Iron Sulfide, Iron Phosphate commonly known as Ferreritas, which due to their characteristics and properties have had a resounding success in the environmental field

Keywords: Nanotechnology; nanoparticles; nanomaterials; nanotubes; carboxymethyl cellulose; iron oxide; titanium oxide.

Resumo

A contaminação da água (superfície e solo), solo, ar, por matéria orgânica, matéria inorgânica como metais pesados (Hg, Cd, Cr, Pb, etc.) despertou interesse científico desde décadas atrás, devido a que as fontes de contaminação aumentam à medida que indústrias e populações crescem, desestabilizando o equilíbrio ambiental, influenciando negativamente a cadeia alimentar.

Devido a essas considerações, o presente trabalho tem como objetivo investigar, por meio da metodologia de revisão bibliográfica, as generalidades da nanotecnologia e dos nanomateriais, os métodos pelos quais é possível sintetizá-los em laboratório (por serem síntese de combustão, deposição eletroquímica, polimerização química, síntese hidrotérmica, deposição de vapor de carbono, deposição sol-gel), suas aplicações e importância nos processos de remediação ambiental com ênfase na remoção de metais pesados, pois são poluentes que geralmente

persistem por longos períodos de tempo. tempo na água, solo, ar, causando danos ambientais, a maioria dos quais é irreversível. Os metais pesados, quando encontrados em altas concentrações nesses meios, geralmente são absorvidos por plantas e animais e até seres humanos por estarem dentro da cadeia alimentar, hospedando-se em seu sistema e causando efeitos negativos à saúde. Os nanomateriais mais comuns usados na eliminação ou mitigação desses metais pesados por absorção e imobilização, de reações ácido/base ou redox, são aqueles que contêm ferro como componente principal de suas estruturas, como o ferro Zero-valente, sulfeto de ferro, fosfato de ferro comumente conhecido como Ferreritas, que devido a suas características e propriedades, tiveram um sucesso retumbante no campo ambiental

Palavras-chave: Nanotecnologia; nanopartículas; nanomateriais; nanotubos; carboximetilcelulose; óxido de ferro; óxido de titânio.

Introducción

La contaminación ambiental ha estado siempre presente y se ha ido incrementando con el desarrollo industrial y poblacional; las zonas urbanas, rurales e industriales son generadoras de desechos y contaminantes de diferente tipo y peligrosidad las mismas que suelen ser eliminadas directamente o luego de un inadecuado tratamiento(1) provocando cambios físicos, químicos y biológicos del agua, suelo o aire.

Los contaminantes de relevancia que se tratan en este trabajo investigativo son químicos, los cuales son sustancias de tipo orgánicas e inorgánicas, naturales o sintéticas generadas durante las actividades industriales y cotidianas que pueden incorporarse al ambiente o aire en diferentes presentaciones como partículas químicas de polvos, humos, gases, vapor, niebla, aerosoles entre otros(2). Estos contaminantes debido a su naturaleza impacto en el medio al ser liberados sin un previo tratamiento o un tratamiento deficiente ocasionan contaminación de la atmósfera(3), contaminación del agua(4)(5) y contaminación del suelo(6), ocasionando cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas(7).

Como alternativa de limpieza o mitigación en las últimas décadas se han ido desarrollando tecnologías amigables con el ambiente que contribuyan a la oxidación, degradación, transformación y completa mineralización de estos contaminantes(8), siendo la nanotecnología o ciencia de los nanomateriales una alternativa aplaudida por muchos investigadores debido a sus elevados rendimientos, bajos costos de síntesis y bajo consumo de energía.

La nanotecnología abarca el uso de nanomateriales que comprenden dimensiones nanométricas (nm) mismos que poseen propiedades y características propias como elevada re-actividad y grado de funcionalización, una considerable área superficial específica y más propiedades dependientes del tamaño(9), por lo que sus campos aplicativos son extensos como en la remediación ambiental, en el área médica, en las energías renovables entre otras.

Los nanomateriales se pueden obtener de manera natural así como también a través de métodos sintéticos controlados en el laboratorio como síntesis de combustión o síntesis de auto propagación a alta temperatura(10), deposición electro-química, polimerización química, deposición sol-gel, deposición de vapor químico (Chemical Vapour Deposition CVD), y a su vez son caracterizados para determinar su pureza y cristalinidad utilizando métodos químicos como espectroscopia de absorción atómica y ópticos como microscopía electrónica de barrido (SEM), microscopia de transmisión electrónica (TEM), espectroscopía infrarroja (IR), espectroscopia de masa (MS), difracción de Rayos X (XRD) entre otras.

Métodos de síntesis

La primera limitante en la síntesis de los nanomateriales es la preparación de las plantillas las cuales deben cumplir con las características y propiedades adecuadas, ya que el material sintetizado adoptara su forma nanoporosa, los mismos que se deben desarrollar a través de una vía química adecuada.

En los métodos actuales a más de la plantilla de origen han tomado en consideración la importancia de controlar (a) las soluciones precursoras utilizadas al preparar el poro (b) la velocidad de la reacción de deposición para evitar el bloqueo de los poros en la superficie de la membrana antes de que ocurra el crecimiento de las nanopartículas(11), (c) buscar la estabilidad térmica y química a través del control de variables como la presión, temperatura, flujo del precursor.

En este apartado se verificará algunos de los métodos sintéticos típicos utilizados en la preparación de nanomateriales, como son:

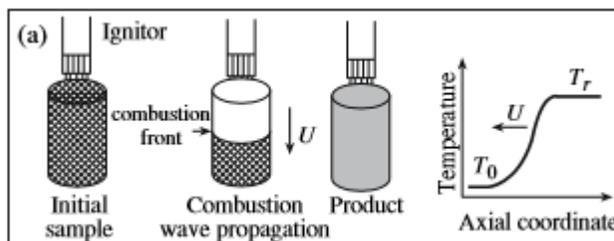
Síntesis de combustión

Conocida también como síntesis de auto propagación a alta temperatura con sus siglas en ingles SHS (self-propagating High-temperature synthesis), en la actualidad es un método de bajo costo

de producción y muy efectivo en la preparación de nanomateriales utilizados en el almacenamiento de energía y protección ambiental(10). Algunas de las ventajas químicas que se tiene la utilizar este tipo de métodos son (i)necesita un equipamiento relativamente simple para la síntesis, (ii) se obtienen productos con una elevada pureza (iii) fase metaestable estabilizada (iv) produce nanomateriales de cualquier forma y tamaño(12). Los métodos son clasificados y analizados en función de la naturaleza física de la reacción media inicial teniendo así reactantes iniciales en fase sólida (combustión en estado sólido), líquida (combustión en fase vapor), gaseosa (combustión en fase gaseosa)(12)(13).

Este método se utiliza para reacciones débilmente exotérmicas que requieren pre-calentamiento antes de la ignición, se caracteriza por el tiempo de encendido de pocos segundos a una velocidad de 0.1 a 10cm/s una vez que la mezcla de reacción exotérmica inicial se enciende por medio de una fuente térmica externa, la temperatura promedio de trabajo es de 1000-3000°C, la onda generada se propaga a través de la mezcla heterogénea de forma auto-sostenida provocando la formación de productos sin que implique energía adicional como se denota en la Figura 1(14).

Figura 1. Síntesis de combustión(14)



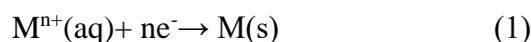
Las aplicaciones de éste método de síntesis van desde la generación de nanomateriales que pueden ser utilizados como catalizadores, celdas de combustibles e incluso en el área de la biotecnología(13).

Deposición electroquímica

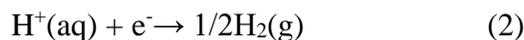
Los métodos de síntesis electroquímica para la elaboración de plantillas son versátiles y simples, la estructura y la morfología de los materiales obtenidos por esta técnica se pueden controlar ajustando los parámetros de deposición, los mismos que pueden ser temperatura, pH, aditivos y potencial de deposición(15). Las ventajas de aplicar estos métodos están relacionados a la posibilidad de obtener la composición estequiométrica de la plantilla de origen, una elevada

pureza que no se logra obtener al aplicar otros métodos formando recubrimientos uniformes con cuerpos de forma compleja(16). El material electroquímico se ocupa de la transferencia de carga en la interfaz entre un material conductor eléctrico y un conductor iónico, así como todas las reacciones que se llevan a cabo dentro de los electrolitos y el equilibrio resultante. La eliminación catódica de metales pesados muestra varios beneficios en términos de costo, seguridad y versatilidad(17)(18)(19). El equipo necesario son sólo baño electro plantado donde se llevan a cabo las siguientes reacciones:

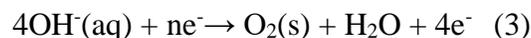
En el cátodo los iones metálicos empiezan a reducirse



Donde M: es el metal y n: es la valencia del metal. A la par se dan varias reacciones de competencia en el cátodo como por ejemplo los iones de H^{+} van a provocar que el mismo se reduzca.



Al mismo tiempo el metal es recubierto para ser depositado en el cátodo para una cuidadosa selección del ánodo tiene que necesariamente se inerte en el electrolito, la reacción que se lleva a cabo es



Polimerización química

Estos métodos suelen ser divididos en métodos de polimerización químicos y electroquímicos, pero tienen la misma finalidad, generar materiales con una elevada capacitancia específica, elevada conductividad, una rápida carga/descarga en la cinética de los electrones de transferencia(20). Las variables de control en este tipo de procedimientos son, la temperatura, concentración del polímero que se requiere, concentración total del monómero, la presencia de pequeñas concentraciones e monómeros que se utilizan durante la reacción la cual se puede mantener durante el proceso, y las características del producto poliméricos al que se desea llegar(21).

La polimerización química en la superficie de una plantilla como puede ser el grafito se lleva a cabo realizando inmersiones de un substrato en la solución que se desea polimerizar luego se inmersa en la solución oxidante(22) así se repite el procedimiento dependiendo de las propiedades que se desea en el producto terminado.

Síntesis Hidrotermal

Un ejemplo para entender el método de síntesis hidrotermal es el que se desarrolla en la naturaleza durante la formación de diferentes minerales en un medio acuoso y temperaturas media de 100°C y 1 bar de presión. Es una síntesis por reacción química de una sustancia en una solución calentada a temperatura y presión ambiental(23)(24). Es un método muy utilizado para las reacciones de síntesis que se llevan a bajas temperaturas(25). En general este tipo de reacciones se llevan a cabo en autoclaves de teflón inmersas en camisas de acero inoxidable con la finalidad de evitar que la autoclave se abra debido a la generación de gases e incremento en la presión, una vez separadas la fase sólida de la solución se extrae el precipitado por centrifugación y las fases sólidas se secan en un horno antes de la caracterización por difracción de rayos X en polvo (RDX), microscopía electrónica de barrido (SEM), TEM entre otros métodos(26)(27).

Deposición sol-gel

Son métodos que aún están siendo investigados debido a su amplio potencial tecnológico(28). A más de la simplicidad del proceso, costos bajos de operación y facilidad de control de la composición, la ventaja más importante es que no requiere aparatos de vacío para su separación ya que tiene el potencial de producir películas con grandes áreas y formas complicadas en diversos sustratos(29)(30). A través de estos métodos podemos sintetizar nanofilamentos y nanotubos de TiO_2 , CdS , SiO_2 , In_2O_3 , Ga_2O_3 , V_2O_5 , MnO_2 , WO_3 , que pueden ser utilizados como semiconductores o también en el área medioambiental para la degradación de compuestos orgánicos como es el caso del TiO_2 (31) el mismo que se obtiene a través del método sol-gel inducido electroquímicamente. Inicialmente se da la generación del ion hidroxilo debido a la reacción catódica provocando que se eleve el pH local en la superficie del electrodo, resultando en la formación del oxihidróxido de titanio en los poros de la plantilla. Al finalizar el proceso se aplica un tratamiento térmico para eliminar la plantilla dando como resultado la formación de los nanohilos de TiO_2 (32). Como el proceso de gelación se lleva a cabo dentro de la plantilla con poros $< 20\text{nm}$ es muy fácil la preparación de estos nanohilos(33).

Deposición de vapor químico

Conocido por sus siglas en inglés CVD (Chemical Vapour Deposition), este método ofrece un control versátil y la posibilidad de ampliar el diámetro de los nanomateriales, es uno de los mejores métodos para producir nanomateriales con propiedades definidas(34). Estos métodos se basan en la inclusión de aparatos de alimentación de precursores de deposición gaseosa reactiva y métodos de deposición de vapor químico(35). Estos equipos de alimentación de precursor de deposición gaseosa reactiva incluyen un pasadizo para la entrada de gas y uno para la salida. Un depósito de acumulador de volumen que en general es un horno tubular estático a través del cual se hace circular el gas precursor, para que se lleve a cabo la deposición de vapor químico es necesario colocar el sustrato semiconductor dentro de la cámara del horno. Un primer precursor de deposición se alimenta a una entrada de un depósito de acumulador de volumen variable con el fin de esterilizar la muestra y reducir el volumen del depósito del acumulador de volumen variable luego se expulsa el segundo precursor y ajustando las condiciones de operación se lleva a cabo el proceso de acumulación en los poros del sustrato(36).

Aplicaciones

Los contaminadas provenientes de las diferentes actividades realizadas por el hombre como por ejemplo aquellas originadas en los procesos industriales(37), de origen hospitalario(38), urbano (aguas domésticas)(39)(40), agrícola entre otras(41), presentan grandes problemas de detección, control y tratamiento, con procedimientos que suelen ser tediosos y de baja eficiencia.

Los problemas más comunes son aquellos relacionados con los metales pesados tales como el cromo, níquel, cadmio, plomo y mercurio que pueden alojarse en el aire, agua y suelo. Los cuales persisten de manera indefinida alterando el equilibrio de la flora y fauna así como también influyendo de manera negativa en la salud de las personas que habitan en comunidades aledañas a los focos de contaminación, debido a la acumulación de estos metales en el cuerpo(42).

Sin embargo, la aplicabilidad de la nanotecnología y lo nanomateriales debido a su versatilidad como absorbentes catalíticos en la remoción de sustancias tóxicas y nocivas con resultados competitivos se han vuelto muy comunes y rentables en comparación a otros procesos. Las nanopartículas de Hierro conocidas como ferreritas son muy útiles en procesos de remediación de aguas residuales debido a su constitución cero-Valente, a su tamaño(1-100nm) en comparación

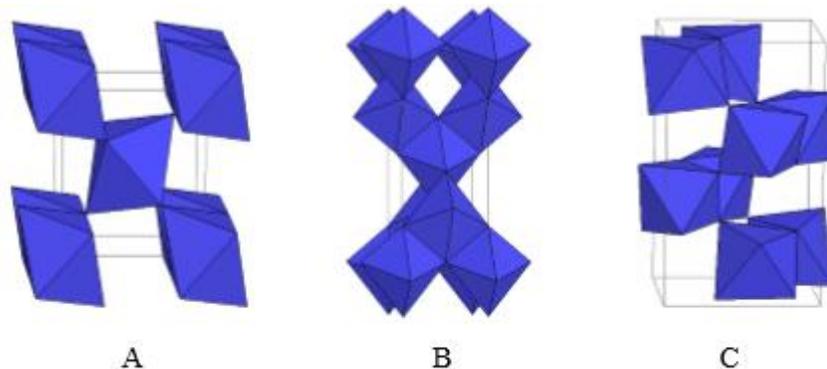
con las células bacterianas que poseen diámetros de 1 μ m, que además pueden permanecer en suspensión por largos periodos de tiempo generando así una zona de tratamiento in situ(43), tomando como base estos compuestos se han generado una gran cantidad de nanomateriales con un sin número de aplicaciones como se detalla a continuación.

1.1. Nanopartículas a base de Dióxido de Titanio (TiO₂)

Es uno de los materiales más utilizados debido a sus características de semi-conducción, fotocatalíticas, electrónicas, de detección de gases, de conversión energética(44).

Los cristales de óxido de Titanio presentan tres tipos de estructuras polimorfas las cuales se van formando en función de las temperaturas de calcinación a las cuales son sometidas como se muestra en la Figura 2 (45).

Figura 2. Estructuras cristalinas del óxido de Titanio (a) rutilo, (b) anatasa, (b) brookita (44).

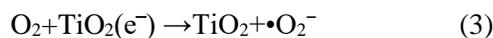
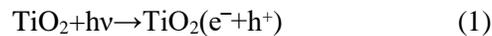


Al igual que los recubrimientos foto catalíticos las nanopartículas de Dióxido de Titanio ayudan a prevenir la proliferación bacteriana en el tratamiento de aguas o el agresivo crecimiento de microorganismos en las superficies de los materiales de construcción.

El dióxido de titanio es ideal para procesos foto catalíticos debido a su bajo costo, a su elevada estabilidad desde el punto de vista químico, baja toxicidad y de fácil obtención(46). Al utilizar óxidos metálicos como el ZnO. SrO, Nb₂O₃, SrTiO₃ junto con el TiO₂ el voltaje de circuito abierto de la célula solar aumenta mejorando la eficiencia de conversión de energía(47). Esta mejora se debe a los siguientes factores (i) la capa de recubrimiento de separación de banda ancha retrasa la posterior transferencia de electrones a la solución de electrolitos y minimiza la recombinación de electrones, (ii) la capa de protección mejora la adsorción del tinte aumentando

el volumen el componente óptico activo(47). Esta técnica es muy aplaudida por los científicos ya que puede descomponer contaminantes orgánicos utilizando energía solar limpia sin la generación de subproductos que pueden ser nocivos.

La eficiencia de esta técnica se debe al daño oxidativo provocado por las especies reactivas de oxígeno presentes como $O_2\bullet$, H_2O_2 y $HO\bullet$, las mismas que se forman en la superficie de las moléculas de TiO_2 cuando son iluminadas por fotones con una energía mayor que su separación de banda, ocasionando que se excite el electrón desde la banda de valencia hasta la banda de conducción creando un par de electrones con agujeros (h^+) y radicales hidroxilo ($OH\bullet$) y a su vez electrones y aniones de superóxido ($O_2\bullet^-$) generados en la banda de conducción, los fotocatalistas TiO_2 irradiados pueden descomponer y mineralizar compuestos orgánicos por una serie de reacciones de oxidación que conducen al dióxido de carbono(48). El mecanismo que sigue la reacción para la generación de radicales ($\bullet OH$ y $\bullet O_2$) se da mediante los siguientes pasos(49):



Otras aplicaciones diferentes de los procesos foto catalíticos(50) utilizados en el tratamiento de aguas residuales que se han desarrollado a base de TiO_2 son los recubrimientos antimicrobianos con gran variedad de aplicaciones como reducir la proliferación de bacterias, hongos y virus en superficies(51), materiales de construcción(52) como baldosas, hormigón, pinturas y gafas debido a sus interesantes propiedades que incluyen estabilidad química, buena transparencia óptica, alto índice de refracción, bajo costo, no toxicidad y ser amigable con el ambiente.

1.2. Nanopartículas a base de Hierro

Este tipo de nanopartículas proporcionan una flexibilidad elevada referente a las remediaciones ambientales in situ y ex situ (44). Estas técnicas se aplican globalmente para la remediación de suelos inyectando o rociando una solución coloidal o un lodo acuoso de nanopartículas sobre el suelo contaminado con la ayuda de la presión y gravedad, se ha demostrado que estos tratamientos degradan eficazmente compuestos orgánicos clorados (tricloroetileno) transformándolos a compuestos amigables con el medio ambiente(53). Las tecnologías de mayor

relevancia estudiadas por científicos con la finalidad de eliminar los metales pesados del suelo a través de la utilización de nanopartículas son la adsorción y estabilización o inmovilización de metales pesados(54).

Caliman y sus colaboradores en una de sus publicaciones describen la clasificación los materiales utilizados en la remediación de suelos contaminados en materiales de adsorción y reactivos, dependiendo del tipo de remediación que se lleve a cabo(55). Donde los materiales de adsorción son los encargados de eliminar los metales pesados como Cu, Hg, Cd, Cr presentes en el suelo por adsorción tanto en la superficie como en la estructura interna, mientras que los reactivos implican reacciones de tipo ácido-base, redox, precipitación/dilución, intercambio iónico, y reacciones de fotocatalisis, convirtiendo los compuestos altamente tóxicos en menos tóxicos. En los párrafos siguientes se analizará los nanomateriales utilizados en la remediación de suelos y que se encuentran dentro de este grupo.

1.2.1. Nanopartículas de hierro cero-Valente

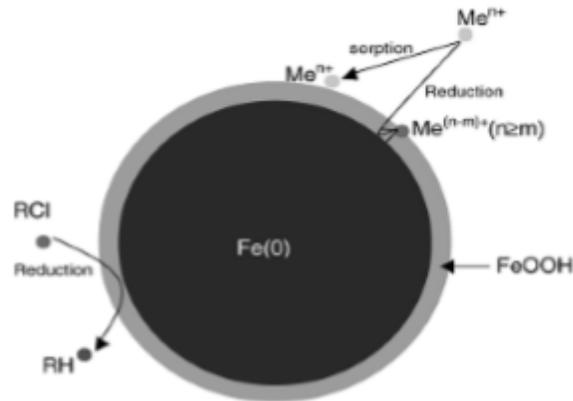
Una de las ventajas de utilizar nanopartículas a base de hierro es su baja toxicidad y abundancia en la tierra, lo que influye en la alta producción y rentabilidad de estos materiales.

Los nanomateriales derivados de hierro cero-Valente (ZVI) poseen las siguientes características:

- Tamaños muy pequeños, permitiendo su fácil alojamiento en los sitios contaminados
- Área superficial muy grande, facilitando el contacto cercano con los contaminantes elevando la eficiencia de descontaminación.
- Presencia de sitios activos, mejorando su re-actividad.
- Se encuentran soluciones coloidales, por lo que se pueden inyectar directamente en suelos, sedimentos, acuíferos contaminados.
- Muy buena adsorción y propiedades reductoras, permitiendo adsorber y reaccionar con los metales pesados como Hg, Ni, Cd, Pb, Cr(55).

Debido a sus extraordinarias propiedades y características son utilizados ampliamente en la remediación de suelos contaminados. Los mecanismos que intervienen en la eliminación de metales pesados son la adsorción y la reducción a través de los cuales los metales pesados se convierten en especies menos tóxicas, se inmovilizan o se vuelven menos disponibles en el suelo(56) como se observa en la Figura 3.

Figura 3. Modelo de carcasa central de hierro nano cero-Valente que muestra varios mecanismos químicos redox(43).



Durante el proceso de descontaminación se dan los siguientes mecanismos de reacción entre el metal y el hierro cero-Valente el cual dependerá del potencial estándar redox (E^0) del metal pesado. Donde, los metales pesados como Cd y Zn poseen un E^0 más negativo que las nanopartículas ZVI o valores similares. Por otro lado, los metales pesados (Cr, As, Cu) con un valor E^0 mucho más positivo que las nanopartículas ZVI se reducen y precipitan en el suelo. Los metales pesados (Pb, Ni) con un valor E^0 ligeramente positivo que las nanopartículas ZVI se reducen y también se absorben en nanopartículas ZVI.

1.2.2. Nanopartículas a base de sulfuro de Hierro

Los minerales de los minerales de sulfuro de hierro (Fe_xS_y) son muy importantes con campos aplicativos y de investigación muy grandes debido a su buena capacidad de inmovilizar metales doble-Valentes, como Mn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} y Hg^{2+} (57)(58) debido a la adsorción o precipitación de los mismos, Figura 4.

Figura 4. Diagrama de los mecanismos de reacción entre las nanopartículas de sulfuro de hierro con varios contaminantes(57)



Muchos científicos en sus estudios de adsorción han utilizado FeS nano particulado de origen sintético debido a su gran área superficial. Estas nanopartículas se sintetizaron mezclando una solución S^{2-} y la solución Fe^{2+} con molar equivalente de Fe y S en un entorno anóxico el cual reacciona y precipita de inmediato(57). En los casos de remediación in situ el suministro de nanopartículas al suelo es muy importante, una de las aplicaciones de mayor relevancia y que está teniendo auge debido a la alta demanda en la explotación minera consiste en inmovilizar, secuestrar o adsorber mercurio (Hg)(59) con la ayuda de FeS con una capacidad de hasta 1700mg/g a un pH de 5.6 formando $HgSO_4$. Pero estos resultados mejoran al incluir dentro de la molécula la carboximetilcelulosa (CMC) misma que reduce la tendencia de agregación inherente de las nanopartículas FeS. Puesto que el mercurio se encuentra unido a las partículas CMC-FeS durante el proceso de remediación a través de los mecanismos de adsorción, incorporación estructural y por último la precipitación del metal inmovilizándolo en el suelo y los sedimentos(44). Las nanopartículas FeS estabilizadas con CMC mostraron una excelente entrega en suelos o sedimentos bajo presión de inyección moderada, y la capacidad de entrega de nanopartículas se puede controlar mediante diferentes presiones de inyección en medios de campo incluso luego de un largo tiempo de ser aplicada. En la actualidad se continúan realizando

experimentos a nivel de laboratorio, pero se requiere que ésta sea también investigada a nivel de campo.

1.2.3. Nanopartículas de fosfato de hierro

Este tipo de nanomateriales al igual que todos los revisados dentro de esta categoría intervienen en la mitigación de los efectos tóxicos ocasionados por los metales pesados presentes en el medio ambiente ocasionando de la misma manera la inmovilización cuando se realiza un tratamiento in situ a través de una aplicación por aspersión o inyección(60).

Las nanopartículas de fosfato de hierro reaccionan con metales pesados formando precipitados de fosfato metálico como por ejemplo Hg_3PO_3 inmovilizando los metales pesados en el suelo, el mecanismo de reacción que sigue es el mismo que si utilizáramos el sulfato de hierro.

Así que las nanopartículas de fosfato de hierro pueden superar los problemas que surgen de los materiales de fosfato comúnmente utilizados, pero al mismo tiempo la eficiencia decrece debido al efecto de las nano-dimensiones que debilita la estabilidad de la partícula(61).

Liu y Zhao en sus publicaciones demostraron que en la remediación in situ de los suelos contaminados $\text{Cu}(\text{II})$ utilizando nanopartículas de fosfato de hierro estabilizado de carboximetilcelulosa (CMC) en una escala de laboratorio. En este proceso, los iones $\text{Cu}(\text{II})$ se inmovilizan mediante la formación de minerales de fosfato de cobre menos solubles. Se sugiere el mecanismo de precipitación y adsorción para la remediación del cobre en el suelo(62)(63). Las nanopartículas de fosfato de hierro no causan riesgo ambiental secundario y son más eficaces que los materiales de fosfato comúnmente utilizados incluso a dosis bajas(64). Como los tamaños de las nanopartículas son muy pequeños (10nm), por lo que mostraron una muy buena entrega en los suelos y se pueden inyectar fácilmente en el suelo de contaminación(62).

1.3. Alofán

El alofán es un mineral de arcilla de corto alcance producido en suelos derivados de la erupción volcánica. Son esferas huecas con un diámetro exterior de 3.5–5.0nm, una pared perforada de aproximadamente 0.6–1.0nm de espesor y un área superficial de 900m²/g, más grande que la del carbón activado(65). Además, los grupos $(\text{OH})\text{Al}(\text{OH}_2)$ expuestos en las perforaciones de la pared son la fuente de las características de carga dependientes del pH del alofán(66). Esta molécula existe en equilibrio formando $^+(\text{OH}_2)\text{Al}(\text{OH}_2)$ mediante la adquisición de protones en el lado ácido del punto de carga cero, y se convierten en $(\text{OH})\text{Al}(\text{OH})$ al perder protones en el lado alcalino formando complejos de esferas internas con los grupos carboxílicos de compuestos

orgánicos. La adsorción de cobre se produce a través de la reacción de intercambio catiónico y la complejidad específica entre los iones de cobre y los grupos (OH)Al(OH₂) de alofán. El valor de pH del suelo contaminado tiene un efecto en la adsorción de Cu, y la adsorción se mejora a un pH más alto.

1.4. Carbón negro

El negro de carbono modificado por la superficie se utiliza para la eliminación de metales pesados a través de la adsorción porque tiene muy buena afinidad con los metales pesados (Zhou et al. 2010). Cheng et al. informaron de la remediación del suelo contaminado por Cu y Zn utilizando negro de carbono modificado en superficie en una escala de laboratorio (Cheng et al. 2014). Los mecanismos sugeridos involucrados en la eliminación de estos metales son la adsorción y la complejidad. Oxidaron el negro de carbono con HNO₃ para introducir grupos funcionales que aumentan el intercambio catiónico de superficie y la capacidad de complejidad del negro de carbono. El experimento de eliminación de metales pesados se llevó a cabo en una casa verde utilizando el cultivo de centeno. Han encontrado que la cantidad de Cu y Zn acumulada en brote de centeno y raíz se redujo significativamente con el aumento de negro de carbono añadido al suelo contaminado. Este resultado sugiere que Cu y Zn fueron adsorbidos y complejos por el negro de carbono modificado y por lo tanto la transferencia de estos metales del suelo al brote y la raíz de centeno estaba prohibida. El negro de carbono modificado podría aplicarse eficazmente para la remediación de suelos contaminados por Cu y Zn.

Conclusión

Concluido el trabajo de revisión bibliográfica se evidencia el incremento en la contaminación ambiental a través de diferentes fuentes a medida que la población crece, a la par se han ido desarrollando nuevas tecnologías amigables con el ambiente y la salud humana como compromiso social. Estas nuevas tecnologías están basadas en la nanotecnología y el uso de nanomateriales, debido a la abundancia de estos en la naturaleza, a la disponibilidad de materias primas para ser sintetizados en el laboratorio y su bajo costo de producción. En comparación a otras metodologías y técnicas aplicadas a la descontaminación del agua, suelo, aire, el uso de nanomateriales y sus derivados presentan eficiencias superiores, con la eliminación total de residuos casi imposibles de tratar como son los compuestos orgánicos y metales pesados, a través

de métodos oxidativos y métodos de adsorción e inmovilización para convertirlos en compuestos menos tóxicos.

Referencias

1. Swinwood JF, Waite TD, Kruger P, Rao SM. Tecnologías de las radiaciones para el tratamiento de desechos : Una perspectiva global. Bol del OIEA. 1994;(1992):11–5.
2. Aspectos físicos , químicos y biológicos de la contaminación hospitalaria. 2014;
3. Gibson J. Air pollution, climate change, and health. Lancet Oncol. 2015;16(6):e269.
4. Del Valle J. El agua, un recurso cada vez más estratégico. El agua ¿fuente Confl o Coop. 2017;71–118.
5. Cerrillo JL, Wittee C, Rey F, Palomares AE. Reducción catalítica de bromatos en fase acuosa mediante catalizadores de Pd .
6. Clara V, Astete J, Lucero M, Sabastizagal I, Oblitas T, Pari J, et al. 5705-9447-1-PB.pdf. 2008;5(1):55–63.
7. Je M, De P. Marcovecchio JE, 1996. Procesos de contaminación en zonas costeras y adyacentes. Frente Marítimo 16 A, 183–192. 2014;(January 1996).
8. Ferrera-Cerrato R, Rojas-Avelizapa NG, Poggi-Varaldo HM, Alarcón A, Cañizares-Villanueva RO. Procesos de biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. Rev Latinoam Microbiol. 2006;48(2):179–87.
9. Bora T, Dutta J. Applications of nanotechnology in wastewater treatment-A review. J Nanosci Nanotechnol. 2014;14(1):613–26.
10. Aruna ST, Mukasyan AS. Combustion synthesis and nanomaterials. Curr Opin Solid State Mater Sci [Internet]. 2008;12(3–4):44–50. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cossms.2008.12.002>
11. Hulteen JC. A general template-based method for the preparation of nanomaterials. J Mater Chem. 1997;7(7):1075–87.
12. Patil KC, Aruna ST, Mimani T. Combustion synthesis: An update. Curr Opin Solid State Mater Sci. 2002;6(6):507–12.

13. Paquin F, Rivnay J, Salleo A, Stingelin N, Silva C. Multi-phase semicrystalline microstructures drive exciton dissociation in neat plastic semiconductors. *J Mater Chem C* [Internet]. 2015;3:10715–22. Available from: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C5TC02043C>
14. Mukasyan AS, Dinka P. Novel approaches to solution-combustion synthesis of nanomaterials. *Int J Self-Propagating High-Temperature Synth.* 2007;16(1):23–35.
15. Wang JG, Tian ML, Kumar N, Mallouk TE. Controllable template synthesis of superconducting Zn nanowires with different microstructures by electrochemical deposition. *Nano Lett.* 2005;5(7):1247–53.
16. Huang LY, Xu KW, Lu J. A study of the process and kinetics of electrochemical deposition and the hydrothermal synthesis of hydroxyapatite coatings. *J Mater Sci Mater Med.* 2000;11(11):667–73.
17. Paul Chen J, Lim LL. Recovery of precious metals by an electrochemical deposition method. *Chemosphere.* 2005;60(10):1384–92.
18. Xu XJ, Fei GT, Yu WH, Wang XW, Chen L, Zhang L De. Preparation and formation mechanism of ZnS semiconductor nanowires made by the electrochemical deposition method. *Nanotechnology.* 2006;17(2):426–9.
19. Cao B, Li Y, Duan G, Cai W. Growth of ZnO nanoneedle arrays with strong ultraviolet emissions by an electrochemical deposition method. *Cryst Growth Des.* 2006;6(5):1091–5.
20. Gnanakan SRP, Rajasekhar M, Subramania A. Synthesis of polythiophene nanoparticles by surfactant - assisted dilute polymerization method for high performance redox supercapacitors. *Int J Electrochem Sci.* 2009;4(9):1289–301.
21. Ea AWH. /27 6/7. 1961;
22. Park JH, Ko JM, Park OO, Kim DW. Capacitance properties of graphite/polypyrrole composite electrode prepared by chemical polymerization of pyrrole on graphite fiber. *J Power Sources.* 2002;105(1):20–5.
23. Feng S, Xu R. New materials in hydrothermal synthesis. *Acc Chem Res.* 2001;34(3):239–47.
24. Komarneni S, Cristina D'arrigo M, Leonelli C, Pellacani GC, Katsuki H. Microwave-Hydrothermal Synthesis of Nanophase Ferrites This paper reports the synthesis of technologically important ferrites such as $ZnFe_2O_4$, $NiFe_2O_4$, $MnFe_2O_4$, and $CoFe_2O_4$ by using novel microwave-hydrothermal processing. *Nanophase ferri.* 1998;43:3041–3.

25. Rabenau A. The Role of Hydrothermal Synthesis in Preparative Chemistry. *Angew Chemie Int Ed English*. 1985;24(12):1026–40.
26. Emadwiandr. 濟無No Title No Title. *J Chem Inf Model*. 2013;53(9):1689–99.
27. Ling L. Hydrothermal Synthesis of Lithium Iron Phosphate Cathodes and Its Electrochemical Performance. 2018;3(May):21–3.
28. Guglielmi M. Sol-Gel Coatings on Metals. *J Sol-Gel Sci Technol*. 1997;8(1–3):443–9.
29. Zhao D, Liu Y, Shen D, Lu Y, Zhang J, Fan X. Photoluminescence properties of Mg_xZn_{1-x}O alloy thin films fabricated by the sol-gel deposition method. *J Appl Phys*. 2001;90(11):5561–3.
30. Lee JH, Park BO. Transparent conducting ZnO:Al, In and Sn thin films deposited by the sol-gel method. *Thin Solid Films*. 2003;426(1–2):94–9.
31. Miao Z, Xu D, Ouyang J, Guo G, Zhao X. Electrochemically Induced Sol – Gel Preparation of Single-Crystalline TiO₂ Nanowires. 2002;
32. Choi H, Stathatos E, Dionysiou DD. Sol-gel preparation of mesoporous photocatalytic TiO₂ films and TiO₂/Al₂O₃ composite membranes for environmental applications. *Appl Catal B Environ*. 2006;63(1–2):60–7.
33. Solids N. P R E C U R S O R S F O R S O L - G E L P R E P A R A T I O N S M. G U G L I E L M I 1 and G. C A R T U R A N 2 1. 1988;100:16–30.
34. Lu C, Liu J. Controlling the Diameter of Carbon Nanotubes in Chemical Vapor Deposition Method by Carbon Feeding. *J Phys Chem B*. 2006;110(41):20254–7.
35. Sandhu GS. (12) United States Patent. 1998;2(12).
36. Chen CM, Dai YM, Huang JG, Jehng JM. Intermetallic catalyst for carbon nanotubes (CNTs) growth by thermal chemical vapor deposition method. *Carbon N Y*. 2006;44(9):1808–20.
37. Ainhoa R, Chica EL, Peñuela GA. Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico Application of Fenton process for treating petrochemical wastewater. *Ingeniería y competitividad [Internet]*. 2014;16(2):211–23. Available from: <http://web.a.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=b70b0043-0aa1-48a3-9a6e-e2e6b870c24a@sessionmgr4004&vid=5&hid=4107>

38. Comportamiento de los indicadores sanitarios y ecotoxicológicos de las aguas residuales con trazas de medicamentos. *Rev Cuba Química*. 2013;XXV(2):180–205.
39. Martínez C, García M, Hernández B, Herrera JD. Cálculo del índice de incumplimiento y costo por pago de derechos en la descarga de agua residual de procesos industriales. (Caso Comarca Lagunera). *Ingeniería*. 2009;13(2):33–9.
40. Chalarca Rodríguez D, Mejía Ruiz R, Aguirre Ramírez N. Approach to the determination of the impact of the wastewater unloads of the municipality of Ayapel, on the wetland waterquality. *Rev Fac Ing Univ Antioquia*. 2007;(40):41–58.
41. Casanova O. Contaminación de aguas subterráneas con nitratos y coliformes en el litoral sudoeste del Uruguay. *Agrociencia - Sitio en Reparación*. 2001;5(1):10–22.344234336010. 2015;
42. Ashutosh Agarwal, Himanshu Joshi. Application of Nanotechnology in the Remediation of Contaminated Groundwater: a Short Review. *Sci Technol*. 2010;2(6)(6):51–7.
43. Chaturvedi S, Dave PN. Environmental application of photocatalysis. Vol. 734, *Materials Science Forum*. 2013. 273–294 p.
44. Haider AJ, Al-Anbari RH, Kadhim GR, Salame CT. Exploring potential Environmental applications of TiO₂ Nanoparticles. *Energy Procedia* [Internet]. 2017;119:332–45. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.117>
45. Hussain M, Ceccarelli R, Marchisio DL, Fino D, Russo N, Geobaldo F. Synthesis, characterization, and photocatalytic application of novel TiO₂ nanoparticles. *Chem Eng J*. 2010;157(1):45–51.
46. Jung HS, Lee JK, Nastasi M, Lee SW, Kim JY, Park JS, et al. Preparation of nanoporous MgO-coated TiO₂ nanoparticles and their application to the electrode of dye-sensitized solar cells. *Langmuir*. 2005;21(23):10332–5.
47. Verdier T, Coutand M, Bertron A, Roques C. Antibacterial activity of TiO₂ photocatalyst alone or in coatings on *E. coli*: The influence of methodological aspects. *Coatings*. 2014;4(3):670–86.
48. Ba-abbad MM, Kadhum AAH, Mohamad AB, Takriff MS. 7064871.Pdf. *Int J Electrochem Sci*. 2012;7:4871–88.

49. Sirimahachai U, Phongpaichit S, Wongnawa S. Evaluation of bactericidal activity of TiO₂ photocatalysts: A comparative study of laboratory-made and commercial TiO₂ samples. *Songklanakarin J Sci Technol*. 2009;31(5):517–25.
50. Haider A, Jameel ZN. Synthesis and Characterization of TiO₂ Nanoparticles via Sol- Gel Method by Pulse Laser Ablation Synthesis and Characterization of TiO₂ Nanoparticles via Sol- Gel Method by Pulse Laser Ablation. *ت ي ئانث ديسكوا موبيناتيتلا تقيرطب تيونانلا لوصلا - تئلاز لابل ل*. 2015;33(December 2016):3–4.
51. Guo S, Wu Z, Zhao W. TiO₂-based building materials: Above and beyond traditional applications. *Chinese Sci Bull*. 2009;54(7):1137–42.
52. Environmental Remediation Technologies for Metal- Contaminated Soils.
53. Bolan N, Kunhikrishnan A, Thangarajan R, Kumpiene J, Park J, Makino T, et al. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils - To mobilize or to immobilize? *J Hazard Mater* [Internet]. 2014;266:141–66. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.018>
54. Caliman FA, Robu BM, Smaranda C, Pavel VL, Gavrilesco M. Soil and groundwater cleanup: Benefits and limits of emerging technologies. *Clean Technol Environ Policy*. 2011;13(2):241–68.
55. Cundy AB, Hopkinson L, Whitby RLD. Use of iron-based technologies in contaminated land and groundwater remediation: A review. *Sci Total Environ* [Internet]. 2008;400(1–3):42–51. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.002>
56. Ting Y, Hsi HC. Iron sulfide minerals as potential active capping materials for mercury-contaminated sediment remediation: A minireview. *Sustain*. 2019;11(6).
57. Gong Y, Gai L, Tang J, Fu J, Wang Q, Zeng EY. Reduction of Cr(VI) in simulated groundwater by FeS-coated iron magnetic nanoparticles. *Sci Total Environ* [Internet]. 2017;595:743–51. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.282>
58. Šípková A, Száková J, Hanč A, Tlustoš P. Mobility of mercury in soil as affected by soil physicochemical properties. *J Soils Sediments*. 2016;16(9):2234–41.
59. Zhao ID, Us AL, Us AL, Us AL, Us AL, Willie F, et al. (12) United States Patent Hg + FeS (s) nHg Hgs (s) + Fe as FeSOS) -Hgn. 2009;2(12).

60. Xu Y, Fang Z, Tsang EP. In situ immobilization of cadmium in soil by stabilized biochar-supported iron phosphate nanoparticles. *Environ Sci Pollut Res* [Internet]. 2016;23(19):19164–72. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-7117-z>
61. Qiao Y, Wu J, Xu Y, Fang Z, Zheng L, Cheng W, et al. Remediation of cadmium in soil by biochar-supported iron phosphate nanoparticles. *Ecol Eng* [Internet]. 2017;106(September):515–22. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.023>
62. Sun RJ, Chen JH, Fan TT, Zhou DM, Wang YJ. Effect of nanoparticle hydroxyapatite on the immobilization of Cu and Zn in polluted soil. *Environ Sci Pollut Res*. 2018;25(1):73–80.
63. Liu W, Tian S, Zhao X, Xie W, Gong Y, Zhao D. Application of Stabilized Nanoparticles for In Situ Remediation of Metal-Contaminated Soil and Groundwater: a Critical Review. *Curr Pollut Reports*. 2015;1(4):280–91.
64. Hiradate S, Wada SI. Weathering process of volcanic glass to allophane determined by ²⁷Al and ²⁹Si solid-state NMR. *Clays Clay Miner*. 2005;53(4):401–8.
65. Iyoda F, Hayashi S, Arakawa S, John B, Okamoto M, Hayashi H, et al. Synthesis and adsorption characteristics of hollow spherical allophane nano-particles. *Appl Clay Sci*. 2012;56:77–83.

References

1. Swinwood JF, Waite TD, Kruger P, Rao SM. Radiation technologies for waste treatment: A global perspective. *IAEA bowl*. 1994; (1992): 11–5.
2. Physical, chemical and biological aspects of hospital contamination. 2014;
3. Gibson J. Air pollution, climate change, and health. *Lancet Oncol*. 2015; 16 (6): e269.
4. Del Valle J. Water, an increasingly strategic resource. *Water source Confl or Coop*. 2017; 71–118.
5. Cerrillo JL, Wittee C, Rey F, Palomares AE. Catalytic reduction of bromates in the aqueous phase using Pd catalysts.
6. Clara V, Astete J, Lucero M, Sabastizagal I, Oblitas T, Pari J, et al. 5705-9447-1-PB.pdf. 2008; 5 (1): 55–63.
7. Je M, De P. Marcovecchio JE, 1996. Pollution processes in coastal and adjacent areas. *Maritime Front* 16 A, 183–192. 2014; (January 1996).

8. Ferrera-Cerrato R, Rojas-Avelizapa NG, Poggi-Varaldo HM, Alarcón A, Cañizares-Villanueva RO. Bioremediation processes of soil and water contaminated by petroleum hydrocarbons and other organic compounds. *Rev Latinoam Microbiol.* 2006; 48 (2): 179–87.
9. Bora T, Dutta J. Applications of nanotechnology in wastewater treatment-A review. *J Nanosci Nanotechnol.* 2014; 14 (1): 613–26.
10. Aruna ST, Mukasyan AS. Combustion synthesis and nanomaterials. *Curr Opin Solid State Mater Sci* [Internet]. 2008; 12 (3–4): 44–50. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cossms.2008.12.002>
11. Hulteen JC. A general template-based method for the preparation of nanomaterials. *J Mater Chem.* 1997; 7 (7): 1075–87.
12. Patil KC, Aruna ST, Mimani T. Combustion synthesis: An update. *Curr Opin Solid State Mater Sci.* 2002; 6 (6): 507–12.
13. Paquin F, Rivnay J, Salleo A, Stingelin N, Silva C. Multi-phase semicrystalline microstructures drive exciton dissociation in neat plastic semiconductors. *J Mater Chem C* [Internet]. 2015; 3: 10715–22. Available from: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C5TC02043C>
14. Mukasyan AS, Dinka P. Novel approaches to solution-combustion synthesis of nanomaterials. *Int J Self-Propagating High-Temperature Synth.* 2007; 16 (1): 23–35.
15. Wang JG, Tian ML, Kumar N, Mallouk TE. Controllable template synthesis of superconducting Zn nanowires with different microstructures by electrochemical deposition. *Nano Lett.* 2005; 5 (7): 1247–53.
16. Huang LY, Xu KW, Lu J. A study of the process and kinetics of electrochemical deposition and the hydrothermal synthesis of hydroxyapatite coatings. *J Mater Sci Mater Med.* 2000; 11 (11): 667–73.
17. Paul Chen J, Lim LL. Recovery of precious metals by an electrochemical deposition method. *Chemosphere.* 2005; 60 (10): 1384–92.
18. Xu XJ, Fei GT, Yu WH, Wang XW, Chen L, Zhang L De. Preparation and formation mechanism of ZnS semiconductor nanowires made by the electrochemical deposition method. *Nanotechnology.* 2006; 17 (2): 426–9.
19. Cao B, Li Y, Duan G, Cai W. Growth of ZnO nanoneedle arrays with strong ultraviolet emissions by an electrochemical deposition method. *Cryst Growth Des.* 2006; 6 (5): 1091–5.

20. Gnanakan SRP, Rajasekhar M, Subramania A. Synthesis of polythiophene nanoparticles by surfactant - assisted dilute polymerization method for high performance redox supercapacitors. *Int J Electrochem Sci.* 2009; 4 (9): 1289–301.
21. Ea AWH. / 27 6/7. 1961;
22. Park JH, Ko JM, Park OO, Kim DW. Capacitance properties of graphite / polypyrrole composite electrode prepared by chemical polymerization of pyrrole on graphite fiber. *J Power Sources.* 2002; 105 (1): 20–5.
23. Feng S, Xu R. New materials in hydrothermal synthesis. *Acc Chem Res.* 2001; 34 (3): 239–47.
24. Komarneni S, Cristina D'arrigo M, Leonelli C, Pellacani GC, Katsuki H. Microwave-Hydrothermal Synthesis of Nanophase Ferrites This paper reports the synthesis of technologically important ferrites such as $ZnFe_2O_4$, $NiFe_2O_4$, $MnFe_2O_4$, and $CoFe_2O_4$ by using novel microwave-hydrothermal processing. *Nanophase ferrite.* 1998; 43: 3041–3.
25. Rabenau A. The Role of Hydrothermal Synthesis in Preparative Chemistry. *Angew Chemie Int Ed English.* 1985; 24 (12): 1026–40.
26. Emadwiandr. 濟 無 No Title No Title. *J Chem Inf Model.* 2013; 53 (9): 1689–99.
27. Ling L. Hydrothermal Synthesis of Lithium Iron Phosphate Cathodes and Its Electrochemical Performance. 2018; 3 (May): 21–3.
28. Guglielmi M. Sol-Gel Coatings on Metals. *J Sol-Gel Sci Technol.* 1997; 8 (1–3): 443–9.
29. Zhao D, Liu Y, Shen D, Lu Y, Zhang J, Fan X. Photoluminescence properties of $Mg_xZn_{1-x}O$ alloy thin films manufactured by the sol-gel deposition method. *J Appl Phys.* 2001; 90 (11): 5561–3.
30. Lee JH, Park BO. Transparent conducting ZnO: Al, In and Sn thin films deposited by the sol-gel method. *Thin Solid Films.* 2003; 426 (1–2): 94–9.
31. Miao Z, Xu D, Ouyang J, Guo G, Zhao X. Electrochemically Induced Sol - Gel Preparation of Single-Crystalline TiO_2 Nanowires. 2002;
32. Choi H, Stathatos E, Dionysiou DD. Sol-gel preparation of mesoporous photocatalytic TiO_2 films and TiO_2 / Al_2O_3 composite membranes for environmental applications. *Appl Catal B Environ.* 2006; 63 (1–2): 60–7.

33. Solids N. P R E C U R S O R S F O R S O L - G E L P R E P A R A T I O N S M. G U G L I E L M I 1 and G. C A R T U R A N 2 1. 1988; 100: 16–30.
34. Lu C, Liu J. Controlling the Diameter of Carbon Nanotubes in Chemical Vapor Deposition Method by Carbon Feeding. *J Phys Chem B*. 2006; 110 (41): 20254–7.
35. Sandhu GS. (12) United States Patent. 1998; 2 (12).
36. Chen CM, Dai YM, Huang JG, Jehng JM. Intermetallic catalyst for carbon nanotubes (CNTs) growth by thermal chemical vapor deposition method. *Carbon N Y*. 2006; 44 (9): 1808–20.
37. Ainhoa R, Chica EL, Peñuela GA. Application of Fenton process for treating petrochemical wastewater. *Engineering and competitiveness* [Internet]. 2014; 16 (2): 211–23. Available from: <http://web.a.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=b70b0043-0aa1-48a3-9a6e-e2e6b870c24a@sessionmgr4004&vid=5&hid=4107>
38. Behavior of sanitary and ecotoxicological indicators of wastewater with traces of drugs. *Rev Cuba Química*. 2013; XXV (2): 180–205.
39. Martínez C, García M, Hernández B, Herrera JD. Calculation of the default rate and cost for payment of rights in the discharge of residual water from industrial processes. (Comarca Lagunera case). *Engineering*. 2009; 13 (2): 33–9.
40. Chalarca Rodríguez D, Mejía Ruiz R, Aguirre Ramírez N. Approach to the determination of the impact of the wastewater unloads of the municipality of Ayapel, on the wetland waterquality. *Rev Fac Ing Univ Antioquia*. 2007; (40): 41–58.
41. Casanova O. Pollution of groundwater with nitrates and coliforms in the southwestern coast of Uruguay. *Agrociencia - Site under Repair*. 2001; 5 (1): 10–22.344234336010. 2015;
42. Ashutosh Agarwal, Himanshu Joshi. Application of Nanotechnology in the Remediation of Contaminated Groundwater: a Short Review. *Sci Technol*. 2010; 2 (6) (6): 51–7.
43. Chaturvedi S, Dave PN. Environmental application of photocatalysis. Vol. 734, *Materials Science Forum*. 2013. 273–294 p.
44. Haider AJ, Al-Anbari RH, Kadhim GR, Salame CT. Exploring potential Environmental applications of TiO₂ Nanoparticles. *Energy Procedia* [Internet]. 2017; 119: 332–45. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.117>

45. Hussain M, Ceccarelli R, Marchisio DL, Fino D, Russo N, Geobaldo F. Synthesis, characterization, and photocatalytic application of novel TiO₂ nanoparticles. *Chem Eng J*. 2010; 157 (1): 45–51.
46. Jung HS, Lee JK, Nastasi M, Lee SW, Kim JY, Park JS, et al. Preparation of nanoporous MgO-coated TiO₂ nanoparticles and their application to the electrode of dye-sensitized solar cells. *Langmuir*. 2005; 21 (23): 10332–5.
47. Verdier T, Coutand M, Bertron A, Roques C. Antibacterial activity of TiO₂ photocatalyst alone or in coatings on *E. coli*: The influence of methodological aspects. *Coatings*. 2014; 4 (3): 670–86.
48. Ba-abbad MM, Kadhum AAH, Mohamad AB, Takriff MS. 7064871.Pdf. *Int J Electrochem Sci*. 2012; 7: 4871–88.
49. Sirimahachai U, Phongpaichit S, Wongnawa S. Evaluation of bactericidal activity of TiO₂ photocatalysts: A comparative study of laboratory-made and commercial TiO₂ samples. *Songklanakarini J Sci Technol*. 2009; 31 (5): 517–25.
50. Haider A, Jameel ZN. Synthesis and Characterization of TiO₂ Nanoparticles via Sol- Gel Method by Pulse Laser Ablation Synthesis and Characterization of TiO₂ Nanoparticles via Sol- Gel Method by Pulse Laser Ablation. *ت ي ن ا ن ذ د ي س ك و ا ه و ي ن ا ت ي ن ل ل ا ت ق ي ر ط ب ت ي و ن ا ن ل ل ا ل و ص ل ل ا - ن ل ل ا ل ا ب ل ج*. 2015; 33 (December 2016): 3–4.
51. Guo S, Wu Z, Zhao W. TiO₂-based building materials: Above and beyond traditional applications. *Chinese Sci Bull*. 2009; 54 (7): 1137–42.
52. Environmental Remediation Technologies for Metal- Contaminated Soils.
53. Bolan N, Kunhikrishnan A, Thangarajan R, Kumpiene J, Park J, Makino T, et al. Remediation of heavy metal (loid) s contaminated soils - To mobilize or to immobilize? *J Hazard Mater* [Internet]. 2014; 266: 141–66. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.018>
54. Caliman FA, Robu BM, Smaranda C, Pavel VL, Gavrilescu M. Soil and groundwater cleanup: Benefits and limits of emerging technologies. *Clean Technol Environ Policy*. 2011; 13 (2): 241–68.
55. Cundy AB, Hopkinson L, Whitby RLD. Use of iron-based technologies in contaminated land and groundwater remediation: A review. *Sci Total Environ* [Internet]. 2008; 400 (1–3): 42–51. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.002>

56. Ting Y, Hsi HC. Iron sulfide minerals as potential active capping materials for mercury-contaminated sediment remediation: A minireview. *Sustain*. 2019; 11 (6).
57. Gong Y, Gai L, Tang J, Fu J, Wang Q, Zeng EY. Reduction of Cr (VI) in simulated groundwater by FeS-coated iron magnetic nanoparticles. *Sci Total Environ* [Internet]. 2017; 595: 743–51. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.282>
58. Šípková A, Száková J, Hanč A, Tlustoš P. Mobility of mercury in soil as affected by soil physicochemical properties. *J Soils Sediments*. 2016; 16 (9): 2234–41.
59. Zhao ID, Us AL, Us AL, Us AL, Us AL, Willie F, et al. (12) United States Patent Hg + FeS (s) nHg Hgs (s) + Fe as FeSOS) -Hgn. 2009; 2 (12).
60. Xu Y, Fang Z, Tsang EP. In situ immobilization of cadmium in soil by stabilized biochar-supported iron phosphate nanoparticles. *Environ Sci Pollut Res* [Internet]. 2016; 23 (19): 19164–72. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-7117-z>
61. Qiao Y, Wu J, Xu Y, Fang Z, Zheng L, Cheng W, et al. Remediation of cadmium in soil by biochar-supported iron phosphate nanoparticles. *Ecol Eng* [Internet]. 2017; 106 (September): 515–22. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.023>
62. Sun RJ, Chen JH, Fan TT, Zhou DM, Wang YJ. Effect of nanoparticle hydroxyapatite on the immobilization of Cu and Zn in polluted soil. *Environ Sci Pollut Res*. 2018; 25 (1): 73–80.
63. Liu W, Tian S, Zhao X, Xie W, Gong Y, Zhao D. Application of Stabilized Nanoparticles for In Situ Remediation of Metal-Contaminated Soil and Groundwater: a Critical Review. *Curr Pollut Reports*. 2015; 1 (4): 280–91.
64. Hiradate S, Wada SI. Weathering process of volcanic glass to allophane determined by ²⁷Al and ²⁹Si solid-state NMR. *Clays Clay Miner*. 2005; 53 (4): 401–8.
65. Iyoda F, Hayashi S, Arakawa S, John B, Okamoto M, Hayashi H, et al. Synthesis and adsorption characteristics of hollow spherical allophane nano-particles. *Appl Clay Sci*. 2012; 56: 77–83.

Referências

1. Swinwood JF, Waite TD, Kruger P, Rao SM. Tecnologias de radiação para tratamento de resíduos: uma perspectiva global. *Taça da AIEA*. 1994; (1992): 11-5.
2. Aspectos físicos, químicos e biológicos da contaminação hospitalar. 2014;

3. Gibson J. Poluição do ar, mudanças climáticas e saúde. *Lancet Oncol.* 2015; 16 (6): e269.
4. Del Valle J. Water, um recurso cada vez mais estratégico. *Fonte de água Confl ou Coop.* 2017; 71-118.
5. Cerrillo JL, Comitê C, Rey F, Palomares AE. Redução catalítica de bromatos na fase aquosa usando catalisadores de Pd.
6. Clara V, Astete J, Lucero M, Sabastizagal I, Oblitas T, Pari J, et al. 5705-9447-1-PB.pdf. 2008; 5 (1): 55–63.
7. Je M, De P. Marcovecchio JE, 1996. Processos de poluição em áreas costeiras e adjacentes. *Frente marítima* 16 A, 183–192. 2014; (janeiro de 1996).
8. Ferrera-Cerrato R, Rojas-Avelizapa NG, Poggi-Varaldo HM, Alarcón A, Cañizares-Villanueva RO. Processos de biorremediação do solo e da água contaminados por hidrocarbonetos de petróleo e outros compostos orgânicos. *Rev Latinoam Microbiol.* 2006; 48 (2): 179–87.
9. Bora T, Dutta J. Aplicações da nanotecnologia no tratamento de águas residuais - Uma revisão. *J Nanosci Nanotechnol.* 2014; 14 (1): 613–26.
10. Aruna ST, Mukasyan AS. Síntese de combustão e nanomateriais. *Curr Opin Estado sólido Mater Sci* [Internet]. 2008; 12 (3-4): 44–50. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cossms.2008.12.002>
11. Hulteen JC. Um método geral baseado em modelo para a preparação de nanomateriais. *J. Mater Chem.* 1997; 7 (7): 1075-1087.
12. Patil KC, Aruna ST, síntese de Mimani T. Combustion: Uma atualização. *Curr Opin Solid State Mater Sci.* 2002; 6 (6): 507–12.
13. Paquin F, Rivnay J, Salleo A, Stingelin N, Silva C. As microestruturas semi-cristalinas multifásicas conduzem à dissociação do exciton em semicondutores plásticos puros. *J Mater Chem C* [Internet]. 2015; 3: 10715–22. Disponível em: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C5TC02043C>
14. Mukasyan AS, Dinka P. Novas abordagens à síntese solução-combustão de nanomateriais. *Int J Sintetizador de alta temperatura autopropagável.* 2007; 16 (1): 23–35.
15. Wang JG, Tian ML, Kumar N, Mallouk TE. Síntese de modelo controlável de nanofios de Zn supercondutores com diferentes microestruturas por deposição eletroquímica. *Nano Lett.* 2005; 5 (7): 1247–53.

16. Huang LY, Xu KW, Lu J. Um estudo do processo e da cinética da deposição eletroquímica e da síntese hidrotérmica de revestimentos de hidroxiapatita. *J Mater Sci Mater Med.* 2000; 11 (11): 667–73.
17. Paul Chen J, Lim LL. Recuperação de metais preciosos pelo método de deposição eletroquímica. *Chemosphere.* 2005; 60 (10): 1384–92.
18. Xu XJ, Fei GT, Yu WH, Wang XW, Chen L, Zhang L. De. Mecanismo de preparação e formação de nanofios semicondutores de ZnS produzidos pelo método de deposição eletroquímica. *Nanotecnologia.* 2006; 17 (2): 426–9.
19. Cao B, Li Y, Duan G, Cai W. Crescimento de matrizes de nanoneedro de ZnO com fortes emissões ultravioleta por um método de deposição eletroquímica. *Crescimento de cristais Des.* 2006; 6 (5): 1091-5.
20. Gnanakan SRP, Rajasekhar M, Subramania A. Síntese de nanopartículas de politiofeno por método de polimerização diluída assistida por surfactante para supercapacitores redox de alto desempenho. *Int J Electrochem Sci.* 2009; 4 (9): 1289–301.
21. Ea AWH. / 27 6/7. 1961;
22. Park JH, Ko JM, Park OO, Kim DW. Propriedades de capacitância do eletrodo composto de grafite / polipirrol preparado por polimerização química de pirrole na fibra de grafite. *J Fontes de energia.* 2002; 105 (1): 20-5.
23. Feng S, Xu R. Novos materiais em síntese hidrotérmica. *Acc Chem Res.* 2001; 34 (3): 239–47.
24. Komarneni S, Cristina D'arrigo M, Leonelli C, Pellacani GC, Katsuki H. Síntese microhidrotérmica de ferritas nanofásicas Este artigo relata a síntese de ferritas tecnologicamente importantes como $ZnFe_2O_4$, $NiFe_2O_4$, $MnFe_2O_4$ e $CoFe_2O_4$ usando um novo processo hidrotermal por microondas. *Balsa de nanofase.* 1998; 43: 3041–3.
25. Rabenau A. O Papel da Síntese Hidrotérmica na Química Preparativa. *Angew Chemie Int Ed English.* 1985; 24 (12): 1026-40.
26. Emadwiandr. Title 無 Sem título Sem título. *J Chem Inf Model.* 2013; 53 (9): 1689–99.
27. Síntese hidrotérmica de Ling L. de cátodos de fosfato de ferro de lítio e seu desempenho eletroquímico. 2018; 3 (maio): 21-3.
28. Guglielmi M. Sol-Gel Coatings on Metals. *J Sol-Gel Sci Technol.* 1997; 8 (1–3): 443–9.

29. Zhao D, Liu Y, Shen D, Lu Y, Zhang J, Fan X. Propriedades de fotoluminescência de filmes finos de liga $Mg_xZn_{1-x}O$ fabricados pelo método de deposição sol-gel. *J Appl Phys.* 2001; 90 (11): 5561–3.
30. Lee JH, Park BO. Filmes finos de ZnO: Al, In e Sn com condução transparente depositados pelo método sol-gel. *Filmes Sólidos Finos.* 2003; 426 (1–2): 94–9.
31. Miao Z, Xu D, Ouyang J, Guo G, Zhao X. Sol induzido eletroquimicamente - Preparação em gel de nanofios de TiO_2 monocristalinos. 2002;
32. Choi H, Stathatos E, Dionysiou DD. Preparação sol-gel de filmes fotocatalíticos mesoporosos de TiO_2 e membranas compostas de TiO_2 / Al_2O_3 para aplicações ambientais. *Appl Catal B Environ.* 2006; 63 (1–2): 60–7.
33. Sólidos N. P R E C U R S O R S P A R A S O L - G E L P R E P A R A T I O N S M. G U G L I E L M I 1 e G. C A R T U R A N 2 1. 1988; 100: 16–30.
34. Lu C, Liu J. Controle do diâmetro de nanotubos de carbono no método de deposição de vapor químico por alimentação de carbono. *J Phys Chem B.* 2006; 110 (41): 20254–7.
35. Sandhu GS. (12) Patente dos Estados Unidos. 1998; 2 (12).
36. Chen CM, Dai YM, Huang JG, Jehng JM. Catalisador intermetálico para o crescimento de nanotubos de carbono (CNTs) pelo método de deposição de vapor químico térmico. *Carbon N Y.* 2006; 44 (9): 1808–20.
37. Ainhoa R, Chica EL, Peñuela GA. Aplicação do processo Fenton no tratamento de águas residuais petroquímicas. *Engenharia e competitividade [Internet].* 2014; 16 (2): 211–23. Disponível em: <http://web.a.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=b70b0043-0aa1-48a3-9a6e-e2e6b870c24a@sessionmgr4004&vid=5&hid=4107>
38. Comportamento de indicadores sanitários e ecotoxicológicos de águas residuais com traços de drogas. *Rev Cuba Química.* 2013; XXV (2): 180–205.
39. Martínez C, García M, Hernández B, Herrera JD. Cálculo da taxa de inadimplência e custo para pagamento de direitos na descarga de água residual de processos industriais. (Caso Comarca Lagunera). *Engenharia.* 2009; 13 (2): 33–9.
40. Chalarca Rodríguez D, Mejía Ruiz R, Aguirre Ramírez N. Abordagem para a determinação do impacto das descargas de águas residuais do município de Ayapel, na qualidade da água das zonas úmidas. *Rev Fac Ing Univ Antioquia.* 2007; (40): 41–58.

41. Casanova O. Poluição de águas subterrâneas com nitratos e coliformes na costa sudoeste do Uruguai. *Agrociencia - Site em reparo*. 2001; 5 (1): 10–22.344234336010. 2015;
42. Ashutosh Agarwal, Himanshu Joshi. Aplicação da nanotecnologia na remediação de águas subterrâneas contaminadas: uma breve revisão. *Sci Technol*. 2010; 2 (6) (6): 51–7.
43. Chaturvedi S, Dave PN. Aplicação ambiental da fotocatalise. Vol. 734, *Fórum de Ciência dos Materiais*. 2013. 273–294 p.
44. Haider AJ, Al-Anbari RH, Kadhim GR, Salame CT. Explorando potenciais aplicações ambientais de nanopartículas de TiO₂. *Energia Procedia [Internet]*. 2017; 119: 332–45. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.117>
45. Hussain M, Ceccarelli R, Marchisio DL, Fino D, Russo N, Geobaldo F. Síntese, caracterização e aplicação fotocatalítica de novas nanopartículas de TiO₂. *Chem Eng J*. 2010; 157 (1): 45–51.
46. Jung HS, Lee JK, Nastasi M, Lee SW, Kim JY, Park JS, et al. Preparação de nanopartículas de TiO₂ nanoporosas e sua aplicação no eletrodo de células solares sensibilizadas por corantes. *Langmuir*. 2005; 21 (23): 10332-5.
47. Verdier T, Coutand M, Bertron A, Roques C. Atividade antibacteriana do fotocatalisador de TiO₂ isoladamente ou em revestimentos de E. coli: A influência de aspectos metodológicos. *Revestimentos*. 2014; 4 (3): 670–86.
48. Ba-abbad MM, Kadhum AAH, Mohamad AB, Takriff MS. 7064871.Pdf. *Int J Electrochem Sci*. 2012; 7: 4871–88.
49. Sirimahachai U, Phongpaichit S, Wongnawa S. Avaliação da atividade bactericida de fotocatalisadores de TiO₂: Um estudo comparativo de amostras de TiO₂ fabricadas em laboratório e comerciais. *Songklanakarin J Sci Technol*. 2009; 31 (5): 517–25.
50. Haider A, Jameel ZN. Síntese e Caracterização de Nanopartículas de TiO₂ por Método Sol-Gel por Ablação a Laser de Pulso Síntese e Caracterização de Nanopartículas de TiO₂ por Método Sol-Gel por Ablação a Laser de Pulso - نانو لاد ل و ص ل ل - نانو لاد ل و ص ل ل. 2015; 33 (dezembro de 2016): 3-4.
51. Guo S, Wu Z, Zhao W. Materiais de construção baseados em TiO₂: Acima e além das aplicações tradicionais. *Touro chinês de Sci*. 2009; 54 (7): 1137–42.
52. Tecnologias de remediação ambiental para solos contaminados por metais.

53. Bolan N, Kunhikrishnan A, Thangarajan R, Kumpiene J, Park J, Makino T, et al. Remediação de solos contaminados com metais pesados (em movimento) - Mobilizar ou imobilizar? *J Hazard Mater* [Internet]. 2014; 266: 141–66. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.018>
54. Caliman FA, Robu BM, Smaranda C, Pavel VL, Gavrilescu M. Limpeza do solo e das águas subterrâneas: benefícios e limites das tecnologias emergentes. *Política de ambiente limpo da Technol.* 2011; 13 (2): 241–68.
55. Cundy AB, Hopkinson L, Whitby RLD. Uso de tecnologias baseadas em ferro na remediação de terras e águas subterrâneas contaminadas: uma revisão. *Sci Total Environ* [Internet]. 2008; 400 (1–3): 42–51. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.002>
56. Ting Y, Hsi HC. Minerais de sulfeto de ferro como potenciais materiais de capeamento ativo para remediação de sedimentos contaminados com mercúrio: uma revisão minirográfica. *Sustentar.* 2019; 11 (6).
57. Gong Y, Gai L, Tang J, Fu J, Wang Q, Zeng EY. Redução de Cr (VI) em águas subterrâneas simuladas por nanopartículas magnéticas de ferro revestidas com FeS. *Sci Total Environ* [Internet]. 2017; 595: 743–51. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.282>
58. Šípková A, Száková J, Hanč A, Tlustoš P. Mobilidade do mercúrio no solo afetada pelas propriedades físico-químicas do solo. *J Solos Sedimentos.* 2016; 16 (9): 2234–41.
59. Zhao ID, EUA AL, EUA AL, EUA AL, EUA AL, Willie F, et al. (12) Patente dos Estados Unidos Hg + FeS (s) nHg Hgs (s) + Fe como FeSOS) -Hgn. 2009; 2 (12).
60. Xu Y, Fang Z, Tsang EP. Imobilização in situ de cádmio no solo por nanopartículas de fosfato de ferro estabilizadas com biochar. *Environ Sci Pollut Res* [Internet]. 2016; 23 (19): 19164–72. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-7117-z>
61. Qiao Y, Wu J, Xu Y, Fang Z, Zheng L, Cheng W, et al. Remediação de cádmio no solo por nanopartículas de fosfato de ferro suportadas por biochar. *Ecol Eng* [Internet]. 2017; 106 (setembro): 515–22. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.023>
62. Sun RJ, Chen JH, TT TT, DM Zhou, YJ Wang. Efeito da hidroxiapatita de nanopartículas na imobilização de Cu e Zn em solo poluído. *Environ Sci Pollut Res.* 2018; 25 (1): 73–80.

63. Liu W, Tian S, Zhao X, Xie W, Gong Y, Zhao D. Aplicação de nanopartículas estabilizadas para remediação in situ de solos e águas subterrâneas contaminados por metais: uma revisão crítica. *Relatórios Curr Pollut.* 2015; 1 (4): 280–91.
64. Hiradate S, Wada SI. Processo de intemperismo de vidro vulcânico em alofano determinado por RMN de estado sólido ^{27}Al e ^{29}Si . *Argila Mineiro.* 2005; 53 (4): 401–8.
65. Iyoda F, Hayashi S, Arakawa S, John B, Okamoto M, Hayashi H, et al. Características de síntese e adsorção de nanopartículas de alofano esféricas ocas. *Appl Clay Sci.* 2012; 56: 77–83.

©2020 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).