

**ANÁLISIS DEL USO DE NANOMATERIALES PARA EL TRATAMIENTO DE  
AGUAS DE PRODUCCIÓN DE CAMPOS PETROLEROS COLOMBIANOS**

**LUZ TATIANA CARRILLO NIETO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2020**

**ANÁLISIS DEL USO DE NANOMATERIALES PARA EL TRATAMIENTO DE  
AGUAS DE PRODUCCIÓN DE CAMPOS PETROLEROS COLOMBIANOS**

**LUZ TATIANA CARRILLO NIETO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero de Petróleos**

**Director**

**Harving Díaz Consuegra**

**Ingeniero de Petróleos**

**Especialista en Ingeniería Ambiental**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2020**

## DEDICATORIA

*A Dios, como motor de mi vida y de cada uno de mis proyectos. Por ser esa luz que me guía y me ilumina en cada momento. Por llenar mi vida de bendiciones y permitirme culminar este logro tan importante en mi vida.*

*A mis padres, por nunca dejarme sola en cada meta, en cada sueño. Por ser esos instrumentos de vida que me acompañan en todo momento haciendo de mí una mujer integra. Por ser mi apoyo y mi ejemplo para siempre seguir adelante a pesar de las adversidades.*

*A mis hermanos, por ser parte de mi vida y de este sueño. Por motivarme en todo momento y ser una voz de aliento para seguir.*

*A toda mi familia por siempre creer en mí y darme fortaleza para nunca dejar de seguir mis sueños.*

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios, por guiarme en cada etapa de mi vida, dándome fortaleza y sabiduría para tomar siempre las mejores decisiones.*

*A mi familia, por ser un apoyo fundamental en cada etapa de mi vida. Por enseñarme a seguir mi corazón y nunca dejar atrás mis sueños.*

*A mi profesor Harving Díaz Consuegra, por ser un apoyo fundamental en cada etapa del proceso de desarrollo de esta tesis, y en su formación integral como docente.*

*A la escuela de Ingeniería de petróleos, por ser un instrumento de aprendizaje a nivel integral y profesional para mi vida.*

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	13
1. GENERALIDADES .....	15
1.1 OBJETIVOS .....	15
1.1.1 Objetivo General .....	15
1.1.2 Objetivos Específicos .....	15
1.2 METODOLOGÍA .....	16
2. MARCO DE REFERENCIA .....	17
2.1 MARCO TEÓRICO .....	17
2.1.1 Industria del petróleo .....	17
2.1.2 Contaminación de las aguas .....	18
2.1.3 Nanotecnología .....	18
2.1.4 Aplicación de los nanomateriales sobre agua y medio ambiente .....	19
2.1.5 Fenol .....	20
2.1.6 Hidrocarburos .....	28
2.1.7 Metales pesados .....	29
2.1.8 Cloruros .....	33
2.2 MARCO LEGAL .....	36
3. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS CRÍTICOS DE SELECCIÓN .....	41
3.1 RIESGO MEDIOAMBIENTAL .....	41
3.2 MÉTODOS CONVENCIONALES DE REMOCIÓN Y COSTOS OPERACIONALES .....	44

4. NANOMATERIALES QUE PRESENTAN REMOCIÓN DE PARÁMETROS CRÍTICOS A NIVEL AMBIENTAL.....	48
4.1 NANOPARTÍCULAS DE TIO <sub>2</sub> Y MGO .....	48
4.1.1 Generalidades del TiO <sub>2</sub> .....	48
4.1.2 Proceso de remoción de fenol con turba y nanopartículas de TiO <sub>2</sub> y MgO ..	49
4.2 NANOPARTÍCULAS DE SIO <sub>2</sub> PARA LA REMOCIÓN DE HIDROCARBUROS .....	50
4.2.1 Generalidades del SiO <sub>2</sub> .....	50
4.2.2 Nanointermedios compuestos por SiO <sub>2</sub> funcionalizados con nanopartículas magnéticas para la remoción de Hidrocarburos .....	51
4.3 NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA .....	53
4.3.1 Generalidades de la magnetita .....	53
4.3.2 Métodos de síntesis de nanopartículas de magnetita .....	54
4.3.3 Proceso de remoción de metales pesados con magnetita.....	59
4.4 NANOPARTÍCULAS DE CEO <sub>2</sub> PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS .....	61
4.5 NANOPARTÍCULAS DERIVADAS DEL CATECOL PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS.....	62
5. ANÁLISIS SISTEMÁTICO DE NANOMATERIALES QUE PRESENTAN CASOS DE ÉXITO EN LA REMOCIÓN DE PARÁMETROS CRÍTICOS A NIVEL AMBIENTAL.....	64
6. APLICABILIDAD DE NANOMATERIALES EN CAMPOS DE LA ORINOQUÍA COLOMBIANA.....	66
7. CONCLUSIONES.....	71
8. RECOMENDACIONES .....	73
BIBLIOGRAFÍA.....	74

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Análisis del cumplimiento de cloruros en campos en etapa de producción. .....	42
Figura 2. Análisis del cumplimiento de hidrocarburos totales en campos en etapa de producción. ....	43
Figura 3. Análisis del cumplimiento de fenoles totales en campos en etapa de exploración.....	43
Figura 4. Estructura cristalina de la magnetita.....	53
Figura 5. Síntesis convencional de MNPs. ....	59

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición Fenol .....	21
Tabla 2. Métodos convencionales de remoción de metales pesados .....	32
Tabla 3. Nanomateriales que presentan casos de éxito en la remoción de parámetros críticos a nivel ambiental.....	64
Tabla 4. Generalidades de los campos Dorotea, Quifa y Rancho Hermoso .....	66
Tabla 5. Niveles de concentración de parámetros críticos ambientales de vertimientos en cuerpos de aguas superficiales. ....	67
Tabla 6. Medidas de concentración post-tratamiento de parámetros críticos ambientales.....	69

## **GLOSARIO**

### **AGUAS RESIDUALES**

Las aguas residuales presentan diferentes orígenes debido al uso del ser humano. A su vez, evidencian un peligro potencial y deben ser desechadas, al contener en ellas una gran cantidad de sustancias y/o microorganismos. <sup>1</sup>

### **CLORUROS**

El ion cloruro es uno de los iones inorgánicos encontrados en mayor cantidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Su presencia es necesaria en aguas potables. <sup>2</sup>

### **FENOLES**

Los fenoles son compuestos orgánicos aromáticos que contienen como su grupo funcional el grupo hidroxilo. Este tipo de compuestos están presentes en las aguas naturales, como producto de la contaminación ambiental y de procesos naturales de descomposición de la materia orgánica. <sup>3</sup>

### **GRASAS Y ACEITES**

El contenido de grasas y aceites en los residuos domésticos, en algunos residuos industriales y en los lodos, se debe considerar para su debida manipulación y tratamiento hasta la disposición final. Al aceite y a la grasa se les da especial atención debido a su escasa solubilidad en el agua y a su tendencia a separarse de la fase acuosa. <sup>4</sup>

---

<sup>1</sup> APOORTE DE LA BIORREMEDIACIÓN PARA SOLUCIONAR PROBLEMAS DE CONTAMINACIÓN Y SU RELACIÓN CON EL DESARROLLO SOSTENIBLE. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/reus/v19n2/0124-7107-reus-19-02-00309.pdf>

<sup>2</sup> ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE CLORUROS TOTALES EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA. Disponible en: <https://aniq.org.mx/Pqta/pdf/NMX-AA-quimicosgpo2.pdf>

<sup>3</sup> PRTR ESPAÑA MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/Fenoles,15658,11,2007.html>

<sup>4</sup>MANUAL DE RECICLAJE Y PLAN DE SOCIALIZACIÓN PARA LA DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS EN EL BARRIO BELLA FLOR DE LA LOCALIDAD DE CIUDAD BOLÍVAR. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/jspui/bitstream/10983/6800/5/DOCUMENTO.pdf>

## **METALES PESADOS**

Diferentes tipos de metales como el plomo, mercurio, cadmio, níquel, vanadio, cromo, cobre, aluminio, arsénico o plata, entre otros, son sustancias tóxicas si presentan concentraciones muy altas. Especialmente tóxicos son sus iones y compuestos.

La mayoría de estos elementos son micronutrientes necesarios para la vida de los seres vivos y deben ser absorbidos por las raíces de las plantas o formar parte de la dieta de los animales. Pero cuando por motivos naturales o por la acción del hombre se acumulan en los suelos, en las aguas o en los seres vivos en concentraciones elevadas, se convierten en tóxicos peligrosos. <sup>5</sup>

## **NANOMATERIALES**

Son materiales estructurados con al menos una dimensión menor que 100 nm o que presentan en su estructura una dimensión en la nanoescala, la cual se extiende en las otras dos dimensiones o capas, como una fina película o recubrimiento superficial. <sup>6</sup>

---

<sup>5</sup> LONDOÑO FRANCO, Luis Fernando, LONDOÑO MUÑOZ, Paula Tatiana y MUÑOZ GARCÍA, Fabián Gerardo. Risk of heavy metals in human and animal health. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v14n2/v14n2a17.pdf>

<sup>6</sup> LIZARAZO SALCEDO, César Germán, **et al.** Nanomaterials: Being Closer to Basics Disponible en: [http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0465-546X2018000200109&lng=es&nrm=iso](http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0465-546X2018000200109&lng=es&nrm=iso)

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS DEL USO DE NANOMATERIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN DE CAMPOS PETROLEROS COLOMBIANOS\*

**AUTOR:** Luz Tatiana Carrillo Nieto\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Nanomateriales, Nanotecnología, Aguas de producción, Tratamiento de aguas residuales, Metales pesados, Cloruros, Fenoles.

### **DESCRIPCIÓN:**

Son muchos los contaminantes presentes en las aguas de consumo humano a causa de actividades en la industria petrolera. Todos estos, generan factores de riesgo para la salud humana y para los diferentes ecosistemas, al presentar un alto grado de toxicidad y un bajo nivel de degradación biológica dada su elevada complejidad estructural. Es por esto, que se hace necesario implementar nuevas tecnologías como la nanotecnología, con el fin de desarrollar procesos que generen eficacia en la remoción parcial o total de estos contaminantes, disminuyendo el impacto ambiental de procesos convencionales, los costos operacionales y dando cumplimiento a los límites de concentración máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

En este proyecto de investigación se tiene como objetivo analizar mediante una revisión sistemática de literatura técnica de diferentes países como Colombia, Estados Unidos, México, España y Canadá, diversos tipos de nanomateriales funcionalizados, identificando aquellos que presenten casos de éxito en la remoción de parámetros críticos a nivel ambiental como fenoles, cloruros, metales pesados, e hidrocarburos. Con el fin, de generar alternativas que permitan desarrollar un tratamiento eficaz en las aguas de producción de campos petroleros colombianos que incumplan con la reglamentación establecida para generar vertimientos.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Harving Díaz Consuegra. Especialista en Ingeniería Ambiental.

## ABSTRACT

**TITLE:** ANALYSIS OF THE USE OF NANOMATERIALS FOR THE TREATMENT OF WATER PRODUCTION OF COLOMBIAN OIL FIELDS\*

**AUTHOR:** Luz Tatiana Carrillo Nieto\*\*

**KEYWORDS:** Nanomaterials, Nanotechnology, Production waters, Wastewater treatment, Heavy metals, Chlorides, Phenols.

### DESCRIPTION:

There are many pollutants present in water for human consumption due to activities in the oil industry. All of these generate risk factors for human health and for different ecosystems, as they present a high degree of toxicity and a low level of biological degradation given their high structural complexity. This is why it is necessary to implement new technologies such as nanotechnology, in order to develop processes that generate efficiency in the partial or total removal of these pollutants, reducing the environmental impact of conventional processes, operating costs and complying with the limits of maximum allowable concentration established in Resolution 0631 of 2015 of the Ministry of Environment and Sustainable Development.

The objective of this research project is to analyze through a systematic review of technical literature from different countries such as Colombia, the United States, Mexico, Spain and Canada, various types of functionalized nanomaterials, identifying those that present successful cases in the removal of parameters environmentally critical such as phenols, chlorides, heavy metals, and hydrocarbons. In order to generate alternatives that allow the development of an effective treatment in the production waters of Colombian oil fields that do not comply with the established regulations to generate discharges.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Harving Díaz Consuegra. Environmental Engineering Specialist.

## INTRODUCCIÓN

Son muchos los factores de riesgo presentes en las aguas de producción a causa de actividades en la industria petrolera. Parámetros críticos como fenoles, cloruros, hidrocarburos, grasas, aceites y metales pesados afectan de manera progresiva la calidad de las aguas, generando cada vez más limitantes en sus tratamientos y posteriores usos.

Por esto el uso de nanotecnología a través de la implementación de nanomateriales como mecanismo de remoción, surge como una tecnología alternativa eficaz y ambientalmente viable, al generar una reducción sustancial en materia de contaminación en comparación a técnicas convencionales empleadas en el tratamiento de aguas residuales.

El objetivo de este trabajo de investigación es analizar la capacidad de diferentes nanomateriales en la remoción de parámetros críticos ambientales presentes en las aguas de producción, de acuerdo con la Resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, utilizando como campos de estudio tres campos petroleros de la Orinoquía Colombiana con incumplimiento en medidas de concentración de diferentes parámetros críticos a nivel ambiental en aguas residuales.

Se emplearon tres criterios de selección en el proceso de identificación de los parámetros críticos a evaluar a nivel ambiental, basados en el riesgo medioambiental, los métodos convencionales de remoción y los costos operacionales; logrando establecer a los fenoles, cloruros, hidrocarburos y metales pesados, como los parámetros críticos ambientales de mayor relevancia a tratar con nanomateriales.

En la siguiente etapa, se realizó el estudio de diferentes nanomateriales como métodos de remoción de los parámetros críticos de interés, mediante un análisis del proceso de síntesis y funcionalización de las nanopartículas, obteniendo una remoción porcentual del 96% en fenoles, una reducción mayor al 90% en

hidrocarburos y mayor al 95% de separación magnética en la remoción de metales pesados.

De acuerdo a los resultados obtenidos, la implementación de nanomateriales como método de remoción, demostró ser eficiente al evidenciar en los tres campos de estudio medidas de concentración post-tratamiento de fenoles, hidrocarburos y metales pesados dentro de los límites máximos permisibles establecidos, dando cumplimiento a la Resolución 0631 del 2015 del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.

## **1. GENERALIDADES**

### **1.1 OBJETIVOS**

#### **1.1.1 Objetivo General**

Analizar la capacidad de diferentes nanomateriales en la remoción de parámetros críticos ambientales presentes en las aguas de producción, de acuerdo con la Resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

#### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Identificar los parámetros críticos a evaluar desde el punto de vista ambiental presentes en las aguas de producción, de acuerdo con la Resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Determinar mediante una revisión sistemática de literatura técnica, los diferentes tipos de nanomateriales que presentan casos de éxito en el proceso de remoción de los parámetros críticos ambientales de interés.
- Analizar la aplicabilidad de los nanomateriales identificados, en algunos campos petroleros de la Orinoquía Colombiana.

## 1.2 METODOLOGÍA

Mediante una revisión sistemática de literatura técnica, se identificaron los diferentes parámetros críticos a evaluar desde el punto de vista ambiental presentes en las aguas de producción, a través de un análisis detallado de los parámetros ambientales que no cumplen la nueva normativa en límites de concentración máximos permisibles en vertimientos a cuerpos de agua superficiales de diferentes campos petroleros, de acuerdo con la Resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. A su vez, usando parámetros de selección como el riesgo medioambiental, dificultades de remoción y costos operacionales, se definieron los parámetros críticos ambientales de mayor relevancia a tratar con nanomateriales, para su respectivo proceso de remoción.

Posteriormente, mediante la revisión de diferentes bases de datos como springer, scopus, science@direct, artículos académicos, tesis y artículos de revistas, se determinaron los diferentes tipos de nanomateriales que presentan casos de éxito en el proceso de remoción de los parámetros críticos ambientales identificados, presentes en las aguas de producción de campos petroleros colombianos. La información recolectada, fue filtrada y clasificada mediante los diferentes tipos de nanomateriales que presentaron menor selectividad según los parámetros ambientales de interés.

Por último, se analizó la aplicabilidad de los nanomateriales identificados en tres campos petroleros de la Orinoquía Colombiana, mediante la recopilación de información de fuentes oficiales y públicas de aguas residuales de producción, con el fin de verificar el cumplimiento de la resolución y establecer potenciales riesgos operacionales y jurídicos, determinando la viabilidad técnica del uso de los nanomateriales identificados en esta investigación, para la respectiva remoción y disminución de los parámetros ambientales de interés en los diferentes campos de estudio elegidos.

## 2. MARCO DE REFERENCIA

### 2.1 MARCO TEÓRICO

**2.1.1 Industria del petróleo.** A lo largo de los años, la industria de los hidrocarburos se ha convertido en uno de los sectores más importantes a nivel mundial. Es tanto su impacto a nivel económico que el petróleo se ha consolidado como un recurso primordial en el desarrollo de la economía mundial mediante su influencia directa en las diferentes actividades del ser humano. Siendo muchos los productos que dependen del petróleo y de sus derivados para su procesamiento y desarrollo.<sup>7</sup>

El agua es un factor primordial en el desarrollo de productos comerciales de las diferentes industrias. Aproximadamente un 59% es destinado a uso industrial, un 30% a consumo agrícola y un 11% a consumo doméstico.

Son muchos los desechos tóxicos generados por la industria de los hidrocarburos que no cuentan con un adecuado sistema de tratamiento previo de aguas, provocando una elevada contaminación de los recursos hídricos al realizarse vertimientos de altas cantidades de aguas residuales a cuerpos de agua sin ninguna regulación. La eliminación de estas aguas de formación puede generar grandes impactos ambientales mediante los materiales altamente contaminantes presentes en su composición, por lo cual es indispensable establecer un correcto manejo de las aguas provenientes del sector industrial para lograr una adecuada sostenibilidad en el consumo del agua y una progresiva regeneración ambiental.<sup>8</sup>

---

<sup>7</sup> MAYORGA GARCÍA, Fernando. La industria petrolera en Colombia. Disponible en: <https://www.banrepcultural.org/biblioteca-virtual/credencial-historia/numero-151/la-industria-petrolera-en-colombia>

<sup>8</sup> MOÑINO AGUILERA, Natàlia y GALDOS BALZATEGI, Ane. Exposición a la contaminación por actividad petrolera y estado de salud de la Comuna Yamanunka. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/4441/tesis.pdf?sequence=1>

**2.1.2 Contaminación de las aguas.** Con el paso del tiempo, se ha incrementado la concientización respecto a la alta contaminación presente en el agua como recurso primordial para la vida humana. Son muchos los químicos contaminantes que generan una progresiva degradación de la calidad de las aguas, afectando cada vez más la sostenibilidad ambiental. La alta toxicidad de estas sustancias y su compleja estructura no permiten un adecuado proceso de degradación, continuando presentes estos tóxicos en los diferentes recursos hídricos.

Las diferentes fuentes de contaminación de las aguas pueden ser de carácter puntual o no puntual. Siendo las de carácter puntual aquellas provenientes de fábricas, refinerías, gasolineras, entre otros. Y de carácter no puntual, aquellas generadas a través de la implementación de plaguicidas en zonas agrícolas, de canales de drenaje y de sistemas de tuberías destinados al proceso de transporte de hidrocarburos.<sup>9</sup>

Sustancias contaminantes como fenoles, cloruros, metales pesados, trazas de hidrocarburos, grasas y aceites provenientes de las aguas residuales generadas por la industria de hidrocarburos, presentan un elevado grado de toxicidad en las aguas. Por lo cual implementar tecnologías que generen una mayor remoción porcentual o total es de vital importancia en su respectivo tratamiento.

**2.1.3 Nanotecnología.** Un nanomaterial, es un tipo de material diseñado y producido en una nanoescala de 1 a 100 nm en una dimensión o más de su estructura. El propósito de estos materiales, es contar con propiedades específicas derivadas del tamaño. Un nanómetro (nm) representa una milésima parte de un micrómetro, longitud que constituye alrededor de 10 átomos de hidrogeno o 6 átomos de carbono alineados.<sup>10</sup>

La nanotecnología, es una tecnología que surge como alternativa para tratar aguas residuales mediante formulación de nanomateriales reactivos, no tóxicos y

---

<sup>9</sup> AGUASRESIDUALES.INFO, Líderes en Información, Formación y Conocimiento para el Sector del Tratamiento del Agua. Disponible en: <https://www.aguasresiduales.info/revista/noticias/causa-y-consecuencias-de-la-contaminacion-del-agua-JNEEY>

<sup>10</sup> NANOTECNÓLOGO. ¿Qué es la nanotecnología? Disponible en: <https://nanotecnologo.com/que-es-la-nanotecnologia/>

altamente efectivos en procesos de neutralización de químicos tóxicos altamente contaminantes.

Los nanomateriales representan una transición entre moléculas y átomos, y pueden ser clasificados en materiales de dimensión cero, de una dimensión, de 2 dimensiones y de 3 dimensiones. Los materiales de dimensión cero están conformados por 3 dimensiones ubicadas en el régimen de escala nanométrica, como las nanopartículas. Los de una dimensión, presentan una variabilidad en su longitud manteniendo una sola dimensión en el régimen nanométrico, como los nanoalambres y nanotubos. Los de dos dimensiones manejan áreas de tamaños no definidos, con medidas de espesor en el orden de 1 a 100 nm, como las películas delgadas. Finalmente, los de 3 dimensiones, forman sólidos tridimensionales mediante unidades nanométricas.<sup>11</sup>

**2.1.4 Aplicación de los nanomateriales sobre agua y medio ambiente.** La nanotecnología en su aplicabilidad en la remediación ambiental, combina diferentes métodos como la ingeniería de procesos, flujos en medios de alta porosidad e impactos ambientales, entre otras áreas de interés. Sus avances ofrecen innumerables oportunidades para el desarrollo de alternativas altamente eficaces en el tratamiento de aguas residuales.<sup>12</sup>

La nanotecnología tiene una amplia aplicabilidad en soluciones ambientales, recuperación de suelos y aguas freáticas con un alto índice de contaminación. A su vez, juega un papel fundamental en el desarrollo de métodos con mayor eficiencia en la eliminación de sustancias contaminantes con refracción, así como en la detección y descontaminación de agentes biológicos altamente perjudiciales.

Su implementación en escala nanométrica ofrece numerosas ventajas en procesos de tratamiento, remediación y detección de contaminantes, al presentar una elevada

---

<sup>11</sup> LIZARAZO SALCEDO, César Germán, **et al.** Nanomaterials: Being Closer to Basics. Disponible en: [http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0465-546X2018000200109&lng=es&nrm=iso](http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0465-546X2018000200109&lng=es&nrm=iso)

<sup>12</sup> *Ibid.*, p.1.

área superficial específica, una alta reactividad y una sensibilidad óptica referente a cambios en tamaños y formas. El uso de nanomateriales en diferentes procesos de remediación de aguas residuales, genera eficacia en tecnologías de membrana empleando técnicas de nanofiltración mediante el aprovechamiento de poros de tamaño nanométrico reteniendo iones divalentes como contaminantes de tamaño inferior. Procesos de oxidación avanzada y de adsorción también evidencian mejoras significativas mediante el uso de las propiedades presentadas en los nanomateriales.<sup>13</sup>

Por tanto, la nanotecnología se presenta como un método con alta eficiencia y calidad en los diferentes procesos de remediación por absorción, sitios de adsorción asociados y mecanismos de reacción.

**2.1.5 Fenol.** El fenol (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>OH) presenta un anillo de benceno en su estructura y está conformado por un grupo hidroxilo en lugar de uno de los átomos de hidrógeno propios del benceno (C<sub>5</sub>H<sub>6</sub>). El fenol en su estado puro, es una sustancia sólida incolora y en su proceso de almacenamiento los cristales se tornan rosados y finalmente rojizos. El olor característico es fuerte, presenta un sabor dulce e irritante y una alta solubilidad en el agua de hasta 87 g/L en concentración.<sup>14</sup>

Es producido por depósitos animales, materia orgánica en descomposición y principalmente por el hombre. Su proceso de obtención se da a partir del hidroperóxido de cumeno, ácido benzoico y clorobenceno.

El fenol presenta reactividad química a través de su grupo fenilo, mediante la reacción con bases y con algunos ácidos en menor medida. En el proceso de reacción con bases, el fenol genera sales como los fenolatos y presenta sensibilidad a agentes oxidantes originando productos como la hidroquinona. A su vez, evidencia reacciones de sustitución electrofílica como halogenación y sulfonación.

---

<sup>13</sup> MEDINA M., Miguel E.; GALVÁN R., Luis E. y REYES G., Rosa E. Las nanopartículas y el medio ambiente. Disponible en: [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1316-48212015000100005](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212015000100005)

<sup>14</sup> PRTR ESPAÑA MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/Fenoles,15658,11,2007.html>

Mediante estas propiedades, el fenol en condiciones ambiente reacciona con otros compuestos generando una estructura altamente alterable convirtiéndose en un compuesto estructuralmente más complejo y de baja capacidad de degradación.<sup>15</sup>

Tabla 1. Composición Fenol

Fórmula química	C6H6O2
Peso molecular	94.12 g/mol
Punto de ebullición	181.8 °C
Punto de fusión	43 °C
Solubilidad en agua	87 g/L a 25 °C
Densidad a 20 °C con densidad de agua a 4 °C	1.0576 g/ml
Coefficiente de partición octanol-agua (logk <sub>ow</sub> )	1.46

Fuente: IDEAM - INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Fenol 4.14. Disponible en:

<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018903/Links/Guia14.pdf>

**2.1.5.1 Problema de contaminación con fenol.** El fenol es uno de los contaminantes orgánicos con más alto grado de toxicidad presente en aguas residuales industriales. Su toxicidad es elevada aún en bajas concentraciones, formando subproductos más tóxicos durante la implementación de procesos de desinfección con cloro y procesos de oxidación, en presencia de aguas naturales. El amplio uso que se le ha dado a estos compuestos fenólicos, ha originado que debido a su alta toxicidad se impida el correcto desarrollo de organismos acuáticos,

<sup>15</sup> IDEAM - INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Fenol 4.14. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018903/Links/Guia14.pdf>

mediante su progresiva acumulación en diversos ambientes. Su limitada capacidad de degradación por procesos convencionales genera inhibición de microorganismos, problema que intensifica la baja capacidad de remoción debido a los variados picos de concentración de fenol presentados, y a la variabilidad del agua en flujo y concentración. <sup>16</sup>

**2.1.5.2 Biodegradación del fenol.** El proceso de biodegradación de hidrocarburos, es un proceso realizado mediante la implementación de enzimas y mecanismos a nivel de membrana, permitiendo la entrada de nutrientes regulada por factores como las características del contaminante, su concentración, tipos de microorganismos presentes, condiciones geoquímicas y ambientales, entre otras. Durante la biodegradación, los microorganismos utilizan parcial o totalmente estos compuestos como fuente de energía o de carbono, logrando su mineralización al degradarlos hasta dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O). <sup>17</sup>

El proceso de degradación del fenol, puede darse en el agua o en el suelo, tanto a nivel biótico como abiótico. Durante las transformaciones abióticas, el fenol reacciona con radicales OH o nitrito en el aire generando posibles reacciones de fotólisis, que, al interactuar con iones de nitrato o radicales peróxidos, forman dihidroxibencenos, nitrifenoles, nitrosfenol y nitroquinona.

En el caso de las transformaciones bióticas, la degradación del fenol está regida por organismos capaces de implementar este compuesto como fuente de carbono y energía. En este tipo de transformaciones, bacterias como las Gram negativas pueden desarrollar el proceso de biodegradación del fenol, siendo el género *Pseudomonas* sp el de mayor relevancia en esta capacidad. A su vez, bacterias Gram positivas como las *Rhodococcus* pueden realizar la degradación de este compuesto, debido a su alta actividad presente de monooxigenasas y dioxigenasas.

---

<sup>16</sup> *Ibíd.*, p. 6.

<sup>17</sup> PARDO DÍAZ, Sergio, et al. Biodegradación de fenol en aguas tratadas de la industria petrolera para re-uso en cultivos agrícolas. Disponible en: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v65n2/0034-7744-rbt-65-02-00685.pdf>

### 2.1.5.3 Factores que afectan el proceso de biodegradación

- **Temperatura**

La temperatura afecta ampliamente el crecimiento, la conservación y la actividad metabólica de los microorganismos, influyendo de manera directa en los cambios químicos y estructurales de los hidrocarburos.

El proceso de biodegradación de los hidrocarburos en el suelo puede desarrollarse en un amplio rango de temperaturas, presentando una disminución cuando la temperatura se encuentra a menos de 20 °C, y un aumento en rangos de 30 °C a 40 °C.<sup>18</sup>

En el caso del fenol, un nivel de temperatura de 30 °C en el proceso de degradación beneficia su biodegradación mediante la acción de microorganismos, al presentar a ésta temperatura una mayor eficiencia en la penetración del fenol a la célula.

- **PH**

El pH influye de manera directa en el proceso de disociación, en la solubilidad de diferentes moléculas y en la disponibilidad de nutrientes, generando afecciones en los microorganismos y en sus enzimas.<sup>19</sup>

Las bacterias heterótrofas y hongos en su mayoría, son desarrollados óptimamente en rangos de pH de 6.5-8.5 cercanos a la neutralidad. El fenol, al ser un hidrocarburo aromático presenta un rango de degradación de 6-8, siendo éste próximo a la condición neutral.

- **Nutrientes**

Los microorganismos necesitan desarrollar procesos de biosíntesis y diferentes funciones celulares, para lograr un óptimo desarrollo y conservación. Cada organismo requiere nutrientes específicos establecidos mediante requerimientos dados para cada género. Sin embargo, en condiciones generales requieren de una

---

<sup>18</sup> VELASCO GOMÉZ, Yuridia. Sistemas de biofiltración empacados con turba y nanopartículas de TiO<sub>2</sub> y MgO para remoción de fenol. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/4441/tesis.pdf?sequence=1>

<sup>19</sup> *Ibíd.*, p. 16.

gran cantidad de macronutrientes como el fósforo y el nitrógeno, y de una baja tasa de micronutrientes como el sodio, potasio, calcio, magnesio y azufre, entre otros.

Los nutrientes presentes en el ambiente son aprovechados mediante estados orgánicos e inorgánicos, siendo la cantidad contenida y el estado de estos, de vital importancia en el desarrollo de procesos de biodegradación.<sup>20</sup>

La bioestimulación ha sido una de las estrategias más ampliamente usadas en procesos de biodegradación. Este proceso consiste en adicionar nutrientes en condiciones estequiométricamente específicas, en una relación de carbono: nitrógeno: fósforo (C: N: P), generando un aumento en el crecimiento de diversos tipos de poblaciones microbianas y la degradación de diferentes compuestos, al establecerse una propicia relación N: P.

Las concentraciones de C, N y P, en ambientes con presencia de contaminación generan variaciones en las diferentes relaciones de nutrientes durante el proceso de biorremediación. La relación 100: 10: 1 es la más usada al mantener un equilibrio de nutrientes en la metabolización microbiana, logrando una aceleración en el proceso de biodegradación. En el proceso de degradación fenólica, relaciones de 100: 10: 2 y 100: 10: 1 son usadas de manera general, al no haber pruebas de laboratorio para determinar concentraciones en campo.

**2.1.5.4 Métodos de eliminación del fenol.** Existen diversos métodos empleados de forma convencional en la remoción del fenol. La aplicación de cada uno de ellos, se ve influenciada de manera directa por la concentración del contaminante presente. Métodos como la incineración y tratamientos de oxidación son efectivos en niveles de concentración de compuestos orgánicos elevados. A su vez, métodos como la adsorción y procesos de oxidación avanzada presentan una alta efectividad en concentraciones de compuestos orgánicos bajas.

---

<sup>20</sup> *Ibíd.*, p. 16.

- **Extracción con disolventes**

Método implementado en el proceso de remoción de fenol en altos niveles de concentración. Es un método económico y efectivo, sin embargo, genera un problema adicional de contaminación al presentar grandes pérdidas de solventes en su implementación. De igual manera, presenta limitaciones al evidenciar remanentes de fenol en altas concentraciones luego del proceso de extracción de solventes y etapa de agotamiento.<sup>21</sup>

- **Incineración**

Método empleado en el proceso de eliminación de fenoles y compuestos aromáticos clorados. Este método es utilizado en presencia de altos niveles de concentración y toxicidad de residuos de contaminantes. Para el desarrollo de este proceso la EPA recomienda un nivel de temperatura de operación de 1600 °C. Sin embargo, la implementación de este método genera costos elevados y subproductos, debido al desarrollo de una combustión incompleta.

La incineración catalítica puede emplearse con el fin de reducir costos al presentar inferiores temperaturas de operación, sin embargo, los átomos de cloro producto de la combustión generan reducciones significativas en la actividad de los catalizadores.<sup>22</sup>

- **Aeración**

Método empleado en la remoción de fenol mediante el aporte de oxígeno a un acuífero. Este aporte se desarrolla mediante el contacto de aire y agua y se ve influenciado de forma directa por el valor de la superficie de contacto, la renovación del gradiente de oxígeno presentado entre aire y agua y por el tiempo disponible para el proceso de difusión del oxígeno.

---

<sup>21</sup> SERNA, Iveth, TORRES, Jesús y HOYOS, Bibian. Recuperación de fenol de aguas residuales industriales por tratamiento con NaCl. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/496/49613904.pdf>

<sup>22</sup> MEDEL REYES, Alejandro. Incineración electroquímica de compuestos fenólicos en matrices complejas. Disponible en: <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/95/1/Interacci%C3%B3n%20electroqu%C3%ADmica%20de%20compuestos%20fen%C3%B3licos%20en%20matrices%20complejas..pdf>

El coeficiente de transferencia de oxígeno es determinado mediante el sistema de aeración empleado y la naturaleza del agua, presentando diferencias en presencia de agua limpia, aguas residuales y materias tenso-activas.<sup>23</sup>

- **Adsorción en carbón activado**

La selección del carbón activado a utilizar en el proceso de remoción de fenoles, se ve influenciado por su área superficial específica. Una mayor área superficial presenta una capacidad de retención de contaminantes mayor. La reducción en el contenido de fenoles, es determinada según la naturaleza, dosis y tipo de carbón implementado.<sup>24</sup>

El carbón empleado durante el proceso de adsorción presenta limitantes al llegar un punto en el cual no hay adsorción de material. Por tanto, este carbón activado debe ser sometido a un proceso de regeneración térmica, química o ser desechado.

La clave de la economía del proceso está en la viabilidad de su regeneración y reutilización.

- **Separación con membranas**

Este método empleado a través de membranas de biofiltración, presenta capacidades de retención de solutos orgánicos con niveles de concentración en rangos de 500-1500 mg/L. Este método presenta limitantes, debido a que el residuo debe ser tratado anteriormente, con el fin de crear una protección en la membrana de cargas excesivas de sólidos en suspensión, valores elevados de pH y trazas de aceites y grasas.

El proceso de retención de fenoles mediante la implementación de membranas presenta mayor efectividad con bajos niveles de pH, siendo la velocidad de flujo determinada de forma directa por valores de presión y temperatura.<sup>25</sup>

---

<sup>23</sup> BOTERO RAIGOZA, Álvaro Javier, FORERO MARCELO, Fabián Esteban. Degradación de fenol mediante procesos avanzados de oxidación – aireación y foto-fenton. estudio a nivel de laboratorio. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/18256/u753994.pdf?sequence=1>

<sup>24</sup> VELASCO GÓMEZ, Op. Cit., p. 11.

<sup>25</sup> VELASCO GÓMEZ, Op. Cit., p. 11.

- **Fotólisis**

Proceso empleado en la remoción de contaminantes orgánicos. Este método presenta ventajas al generar un aumento en la velocidad de reacción, reducción en el uso de tanques de gran tamaño, mayor compactación en sistemas de tratamiento y reducción de costos operativos debido a un consumo inferior de potencia para la generación de OH. <sup>26</sup>

La aplicación de fotólisis como método de remoción en hidrocarburos de tipo aromático no presenta eficacia por sí misma, debido a que evidencia constantes de velocidad de reacción de 0.0019 min<sup>-1</sup> a 254 nm. Sin embargo, las velocidades presentan mejoras, mediante la adición de peróxido de hidrogeno, evidenciando valores de velocidad de 0.199 min<sup>-1</sup>.

- **Proceso de oxidación avanzada**

Este método tiene por objetivo la remoción de diferentes compuestos solubles no biodegradables, con presencia en aguas residuales. Su operación se da, mediante condiciones bajas de presión y temperatura. El agente oxidante usado en el proceso, es un hidroxilo (OH<sup>-</sup>) con alta capacidad de oxidación y bajos tiempos de reacción. <sup>27</sup>

Presenta limitaciones en medios de efluentes con niveles de cargas orgánicas elevadas. En este método la remoción del fenol puede desarrollarse por diferentes procesos fisicoquímicos, sin embargo, presenta altos costos operativos y formación de productos peligrosos.

---

<sup>26</sup> VELASCO GÓMEZ, Op. Cit., p. 12.

<sup>27</sup> BOTERO RAIGOZA, FORERO MARCELO, Op. Cit., p. 13.

**2.1.6 Hidrocarburos.** Los hidrocarburos son compuestos orgánicos constituidos por átomos de hidrogeno y carbono. Son hidrofóbicos, lipofílicos y no presentan biodegradabilidad. Su proceso de combustión se da de manera completa o incompleta. Durante una combustión completa genera productos residuales como agua y dióxido de carbono y durante un proceso de combustión incompleta produce agua, carbono y monóxido de carbono. <sup>28</sup>

Los hidrocarburos según su mecanismo de clasificación se dividen en hidrocarburos aromáticos e hidrocarburos alifáticos. Los hidrocarburos aromáticos son compuestos orgánicos con carácter cíclico y presencia de benceno como núcleo común. Este tipo de hidrocarburos pueden clasificarse a su vez en monocíclicos o policíclicos. Los policíclicos presentan dos o más núcleos de benceno en su estructura y los monocíclicos se caracterizan por presentar sustitución de una molécula de hidrogeno del anillo de benceno por residuos hidrocarbonados.

Los hidrocarburos alifáticos presentan una estructura constituida principalmente por hidrogeno y carbono, sin presentar carácter aromático. Este tipo de hidrocarburos cuentan con cadenas abiertas de manera lineal o ramificada y se clasifican en saturados o no saturados según su estructura. Los hidrocarburos saturados son también conocidos como alcanos y presentan enlaces de carbono de tipo simple. Los hidrocarburos no saturados, también conocidos como alquenos y alquinos presentan en su estructura enlaces dobles o triples de carbono, respectivamente. Estos se encuentran principalmente en yacimientos, depósitos o reservorios a nivel del subsuelo tanto en plataformas terrestres como marinas. <sup>29</sup>

**2.1.6.1 Problema de contaminación con hidrocarburos.** Los derrames de hidrocarburo se han consolidado como una de las principales fuentes de contaminación de suelos y aguas, al ocasionar problemas fisiológicos y bioquímicos en los diferentes organismos afectados. Estas afecciones generan impactos en su

---

<sup>28</sup> HIDROCARBUROS. Disponible en: <https://www.significados.com/hidrocarburos/>

<sup>29</sup> *Ibíd.*, p. 1.

viabilidad y éxito reproductivo mediante diversas alteraciones genéticas. Los hidrocarburos de tipo aromático presentan una toxicidad mayor al acumularse en grasas, haciendo difícil el proceso de remoción por el organismo.<sup>30</sup>

Los impactos ocasionados por trazas de hidrocarburos presentan efectos de carácter directo e indirecto. Los efectos directos se pueden dar de forma letal o subletal debido a la bioacumulación de contaminantes y los efectos indirectos evidencian principalmente perturbaciones en los ecosistemas, generando cambios y alteraciones en la estructura de las diferentes comunidades ecológicas y en su red de interrelaciones existentes.

**2.1.7 Metales pesados.** Los metales pesados son componentes presentes de forma natural en la corteza de la tierra. Hacen parte de un grupo de elementos químicos y su densidad es 5 veces superior a la del agua, siendo altamente tóxicos a bajos niveles de concentración. Este tipo de componentes no presenta degradación y en pequeñas cantidades pueden ser introducidos al cuerpo de organismos vivos por medio de alimentos, aire o a través de aguas residuales obtenidas por depósitos o residuos industriales.<sup>31</sup>

Los metales pesados se encuentran de forma libre y natural en los ecosistemas, y pueden presentar variaciones en sus niveles de concentración. Son necesarios en pequeñas cantidades para el correcto desarrollo de funciones biológicas de los organismos vivos. Sin embargo, metales como el mercurio, plomo, cadmio y arsénico evidencian mayor grado de toxicidad, pudiendo presentar condiciones de envenenamiento en altas concentraciones.

El cadmio presenta un color blanco ligeramente azulado, un peso atómico de 112 y una densidad relativa de 8. Presenta 8 isótopos estables y 11 radioisótopos inestables de tipo artificial, siendo su presencia relativamente rara en la naturaleza.

---

<sup>30</sup> IMPACTO AMBIENTAL DE LOS HIDROCARBUROS Y RECUPERACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS. Disponible en: [https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/contaminacion-marina-accidental/impacto\\_ambiental.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/contaminacion-marina-accidental/impacto_ambiental.aspx)

<sup>31</sup> LONDOÑO FRANCO, Luis Fernando, LONDOÑO MUÑOZ, Paula Tatiana y MUÑOZ GARCÍA, Fabián Gerardo. Risk of heavy metals in human and animal health. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v14n2/v14n2a17.pdf>

El arsénico es distribuido de forma amplia en la naturaleza con un peso atómico de 74 y un número atómico de 33. Presenta en su estructura 17 nucleídos radioactivos, siendo un conductor térmico y eléctrico de alto rompimiento y baja ductibilidad.<sup>32</sup>

El plomo presenta diferentes formaciones de sales, óxidos y compuestos organometálicos con un número atómico de 82 y un peso atómico de 207. Su color es azulado y es encontrado en diferentes metales como uranio y torio debido a su procedencia por división radioactiva.

El cobre está constituido por dos isótopos naturales estables y 9 isótopos inestables de carácter radioactivo. Su utilidad se ve influenciada por diversas propiedades químicas, eléctricas, físicas y mecánicas. Es un metal no ferroso y presenta un número atómico de 29.

El mercurio es un líquido blanco plateado a condiciones de temperatura ambiente. Presenta un número atómico de 80 y un peso atómico de 200. Su tensión superficial en forma líquida tiene un valor de 484 dinas/cm, siendo 6 veces superior a la del agua en contacto con el aire.<sup>33</sup>

Propiedades principales como el PH, procesos de óxido-reducción, materia orgánica, minerales de arcilla, oxihidróxidos de hierro y manganeso y mecanismos de intercambio iónico, actúan generando un control en factores de acumulación, movilidad y biodisponibilidad de metales pesados en el suelo.

**2.1.7.1 Problema de contaminación con metales pesados.** Los metales pesados presentan elevados niveles de toxicidad y rangos de concentración permitidos muy limitados en aguas aptas para consumo humano, debido a sus efectos perjudiciales en la salud. Los que presentan mayor susceptibilidad en tema de contaminación son mercurio, níquel, cobre, plomo y cromo.

---

<sup>32</sup> *Ibid.*, p. 4.

<sup>33</sup> *Ibid.*, p. 6.

El incremento en la concentración de estos compuestos se da principalmente por contaminaciones puntuales de origen industrial o minero. Al no poder ser degradados de manera química o biológica, representan un peligro potencial, presentando una alta tasa de bioacumulación y biomagnificación en los diferentes organismos vivos, mediante efectos tóxicos que se incrementan debido a la elevada concentración del metal en exposición.<sup>34</sup>

La toxicidad de los metales se da por sus características químicas, niveles de concentración y tipos de compuestos o metabolito resultantes de su formación. En cada organismo se evidencia un nivel de toxicidad diferente, generando afecciones fisiológicas, bioquímicas y estructurales. El cadmio en una alta exposición y concentración en los humanos, presenta condiciones de anemia, disfunción renal, osteomalacia, trastornos respiratorios, trastornos nerviosos, cáncer de próstata y cáncer de pulmón, entre otros. El arsénico en altos niveles de concentración al ser una sustancia altamente cancerígena, produce efectos letales que evidencian ceguera, parálisis, arritmias cardíacas, melanosis y leucopenia.

El plomo genera alteraciones en el sistema nervioso central, intoxicación crónica, cefaleas, parálisis y encefalopatía. A su vez, el mercurio produce efectos teratogénicos, neurotoxicidad, daño renal, intoxicación crónica, pérdida de visión, estado de coma y muerte, entre otros.<sup>35</sup>

**2.1.7.2 Métodos de remoción convencionales de metales pesados.** Para el tratamiento de metales pesados en aguas han sido implementados diferentes métodos de remoción como la precipitación química, la filtración de membrana, el intercambio iónico y la adsorción. Estos métodos presentan limitaciones debido a la interferencia con otros compuestos en el agua, a su poca transferencia de masa,

---

<sup>34</sup> ROMERO LEDEZMA, Karla Pamela. CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS. Disponible en: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1817-74332009000100013](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1817-74332009000100013)

<sup>35</sup> *Ibíd.*, p. 1.

altas caídas de presión, regeneración del sistema de tratamiento, crecimiento de bacterias, rápida saturación y utilización de solventes, entre otros.

Debido a esto, se ha generado la importancia de implementar nuevas tecnologías como la nanotecnología que reflejen avances significativos en el desarrollo de tratamientos de agua, presentando una mayor efectividad y menos limitantes en la remoción de contaminantes que los métodos convencionales.<sup>36</sup>

Tabla 2. Métodos convencionales de remoción de metales pesados

<b>MÉTODOS CONVENCIONALES</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>LIMITANTES</b>
<b>Precipitación química y bio-precipitación</b>	Este método presenta una operación simple y bajos costos operativos.	Evidencia limitantes al generar lodos y costos extra en el tratamiento de lodos generados.
<b>Coagulación/Floculación</b>	Método efectivo en la remoción de metales y de turbidez en las aguas. Presenta un proceso eficaz en la decantación y deshidratación de lodos producidos.	Genera incrementos en la producción de lodos y requiere tratamientos posteriores.
<b>Intercambio iónico y separación electroquímica</b>	Este método presenta una elevada capacidad de tratamiento, alta eficiencia y rápida cinética.	Presenta altos costos en la parte operativa y en el proceso de regeneración de membranas implementadas o ánodos y cátodos.

<sup>36</sup> MARIMON BOLIVAR, Wilfredo. Ingeniería de nanopartículas magnéticas para la remoción de metales pesados en aguas. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/39649/Documento.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

MÉTODOS CONVENCIONALES	VENTAJAS	LIMITANTES
Adsorción	Presenta bajos costos y fáciles condiciones de operación. Cuenta con altos rangos de pH y altas capacidades de remoción durante su proceso de operación.	Presenta baja selectividad, altas caídas de presión, crecimiento de bacterias, dificultad en la regeneración de sitios porosos y formación de productos residuales.

Fuente: MARIMON BOLIVAR, Wilfredo. Ingeniería de nanopartículas magnéticas para la remoción de metales pesados en aguas. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/39649/Documento.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

**2.1.8 Cloruros.** El ion cloruro es uno de los iones con mayor difusión en aguas naturales. Son compuestos constituidos por un átomo de cloro y presentan un estado de oxidación formal -1. Es uno de los principales aniones inorgánicos presentes en el agua y su contenido proviene de fuentes naturales, aguas residuales y vertidos industriales.

Los cloruros son un tipo de haluros y pueden ser clasificados en orgánicos e inorgánicos. Los cloruros de tipo inorgánico, son sustancias sólidas incoloras que presentan un elevado punto de fusión y una alta solubilidad en agua. En presencia de elementos oxidantes fuertes, los cloruros pueden ser oxidados a un estado de cloro elemental al ser el cloro altamente electronegativo.<sup>37</sup>

Los cloruros de tipo orgánico, están constituidos por átomos de cloro unidos a átomos de carbono mediante enlaces covalentes. Son compuestos que presentan una alta polarización debido a la elevada electronegatividad del cloro sobre el

<sup>37</sup> CLORUROS. Disponible en: <https://www.quimicas.net/2015/08/ejemplos-de-cloruros.html>

carbono. Este tipo de cloruros suelen ser menos inflamables que los hidrocarburos correspondientes y a su vez evidenciar una mayor toxicidad.

En la naturaleza las sales de cloruro de sodio, cloruro de potasio y cloruro de calcio están ampliamente distribuidas, presentando valores de solubilidad en agua fría de 357, 344 y 745 g/L, respectivamente. <sup>38</sup>

**2.1.8.1 Problema de contaminación con cloruros.** Las aguas naturales presentan variabilidad en su contenido de cloruros según el terreno al que son expuestas. Incrementos superiores a los límites reglamentarios, generan efectos perjudiciales, al presentar un elevado grado de toxicidad en altas concentraciones. Las aguas con presencia de cloruros evidencian una alta corrosión debido al tamaño pequeño del ion, el cual puede penetrar la capa protectora del metal, generando afecciones en estructuras metálicas, daños en tuberías e impidiendo el crecimiento de plantas. A su vez, niveles altos de concentración en aguas residuales durante la implementación del riego en campos agrícolas, deterioran en gran medida la calidad de los suelos. <sup>39</sup>

### **2.1.8.2 Métodos convencionales de remoción de cloruros**

- **Sistema de Ósmosis Inversa**

El sistema de ósmosis inversa implementa membranas semipermeables, las cuales son ampliamente utilizadas en altos y bajos niveles de concentración en salinidad. Estas membranas permiten el paso del agua, proporcionando una medida de retención del 90-99% de todos los elementos minerales disueltos, entre un 95 y 99%

---

<sup>38</sup> JARAVA GALVÁN, Rafael y PLANETA BARROS, Irlanda Patricia. Análisis de alternativas para la remoción de cloruros presentes en las aguas residuales industriales de producción del Campo Cicuco Ecopetrol S.A. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/13789/1052040776.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

<sup>39</sup> AMBIENTUM. Determinación de cloruro. Disponible en: [https://www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental/aguas/determinacion\\_de\\_cloruro.asp#:~:text=En%20%C3%BAltimo%20caso%2C%20el%20aumento,del%20agua%20por%20aguas%20residuales.&text=El%20contenido%20en%20cloruros%20no,y%20perjudicar%20el%20crecimiento%20vegetal.](https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/aguas/determinacion_de_cloruro.asp#:~:text=En%20%C3%BAltimo%20caso%2C%20el%20aumento,del%20agua%20por%20aguas%20residuales.&text=El%20contenido%20en%20cloruros%20no,y%20perjudicar%20el%20crecimiento%20vegetal.)

de gran parte de elementos químicos y una retención del 100% de materias coloidales finas como sílice coloidal, virus y bacterias.

Este método presenta un bajo costo de producción presentando viabilidad técnico-económica. A su vez, es un proceso limpio, sin efluentes ácidos o alcalinos. Sin embargo este método presenta limitaciones al generar una reducción de pH en agua, lo cual genera costos adicionales de post tratamiento alcalino al que debe ser sometido el permeado para mantener un nivel de pH dentro de los parámetros reglamentarios. De igual forma, se deben realizar mantenimientos preventivos de forma constante a las membranas, con el fin de evitar una disminución en la eficiencia y post-tratamientos, para aumentar diferentes parámetros físico-químicos y evitar un alto nivel de acidez en el agua.<sup>40</sup>

- **Sistema de Intercambio Iónico**

El sistema de intercambio iónico presenta una eficiencia mayor al 80 %. Este método es ampliamente utilizado en niveles de salinidad de agua de alimentación bajos. Presenta una fácil capacidad de automatización y resinas con alta estabilidad química, larga duración y fácil regeneración.

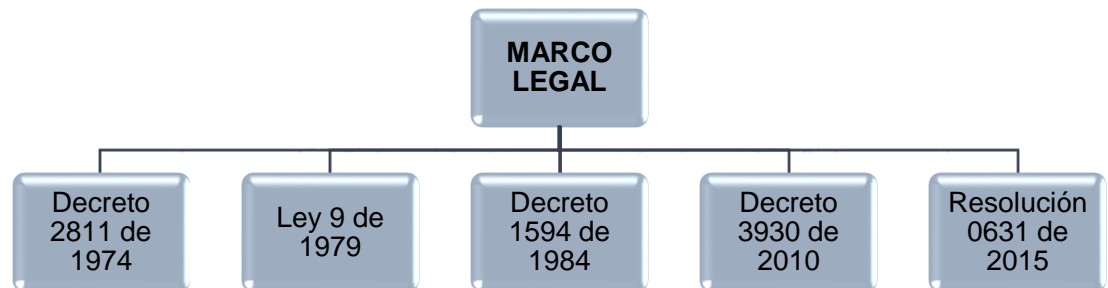
Este proceso de remoción, presenta diferentes limitantes al necesitar una alta disponibilidad de regenerantes en planta, generando elevados niveles de consumo e incrementos significativos en costos. A su vez, requiere tratamientos posteriores de alto costo, al ser un proceso sucio con efluentes ácidos y alcalinos. No presenta remoción de bacterias, sustancias orgánicas, partículas y pirógenos de forma efectiva, generando costos de post-tratamientos. De igual forma, este método requiere de una gran cantidad de resinas y regeneradores en altas tasas de alimentación, incrementando los costos de producción.<sup>41</sup>

---

<sup>40</sup> JARAVA GALVÁN y PLANETA BARROS, Op. Cit., p. 27.

<sup>41</sup> *Ibíd.*, p. 55.

## 2.2 MARCO LEGAL



- **Decreto 2811 de 1974**

En este decreto se establece el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. En el cual se determina que el ambiente es patrimonio común y que la entidad del estado y los particulares deben participar en el respectivo proceso de preservación y manejo. Siendo la preservación y manejo de los recursos naturales renovables de utilidad pública e interés social.<sup>42</sup>

A su vez, se determina que al ser el ambiente patrimonio común de la humanidad, es necesario para la supervivencia y el desarrollo económico y social de los pueblos. Siendo de vital importancia implementar un proceso de mejoramiento y utilización racional de los recursos naturales renovables, mediante determinados criterios de equidad que garanticen un desarrollo armónico del hombre y de los recursos; con el fin de consolidar la disponibilidad permanente de estos y la mayor participación social en beneficio de la salud y bienestar de los habitantes del territorio nacional.

En conjunto se establecen medidas para la prevención y el control de los diferentes efectos nocivos del proceso de explotación de recursos naturales no renovables

---

<sup>42</sup> DECRETO 2811 DEL 18 DE DICIEMBRE DE 1974. Disponible en: [https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto\\_2811\\_de\\_1974.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_2811_de_1974.pdf)

sobre los demás recursos. Estableciendo una regulación en la conducta humana y en la actividad de la administración pública tanto en el ámbito individual como colectivo, así como en las diversas relaciones dadas mediante el aprovechamiento y conservación de los recursos y del ambiente.<sup>43</sup>

- **Ley 9 de 1979**

Esta ley es establecida como el Código Sanitario Nacional. En esta se crean diferentes medidas para el control y saneamiento con el fin de preservar, restaurar y mejorar la salud del ser humano. De igual manera, se determinan los diversos procedimientos y las medidas a implementar para la regulación, legalización y control de la disposición de residuos y materiales que generen distintas afecciones en las condiciones sanitarias del ambiente.<sup>44</sup>

A su vez, se genera aplicabilidad en las normas de protección referentes a calidad de las aguas, tanto a entidades públicas como privadas.

Se establece un control sanitario del uso de las aguas mediante su uso doméstico, recreativo, industrial, agrícola, pecuario, de transporte, de preservación de la fauna y flora o de consumo humano. Con el fin de identificar, cuales requieran una respectiva autorización previa a las concesiones otorgadas por la autoridad competente, al presentar un potencial de contaminación de las aguas.<sup>45</sup>

El proceso de descarga de las aguas provenientes de residuos, deberá regirse mediante las reglamentaciones establecidas para fuentes receptoras por el Ministerio de salud.

---

<sup>43</sup> *Ibíd.*, p. 4.

<sup>44</sup> LEY 9 DE 1979. Disponible en: [https://www.minsalud.gov.co/Normatividad\\_Nuevo/LEY%200009%20DE%201979.pdf](https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/LEY%200009%20DE%201979.pdf)

<sup>45</sup> *Ibíd.*, p. 3.

- **Decreto 1594 de 1984**

Este decreto determina los diferentes parámetros a implementar para los tratamientos de aguas de acuerdo a su método de uso y disposición. Teniendo en cuenta, que el agua residual debe presentar una remoción de la carga orgánica del 80% como valor límite mínimo permisible para el proceso de vertido a una fuente superficial. Este decreto se menciona como recuento histórico, ya que fue derogado parcialmente por el Decreto 3930 de 2010 y será derogado totalmente con la entrada en vigencia de la resolución 0631 de 2015.<sup>46</sup>

- **Decreto 3930 de 2010**

Este decreto anula el Decreto 1594 de 1984 exceptuando el artículo 20 y 21 y establece un régimen de transición legal con una vigencia temporal (artículo 76). A su vez, determina las disposiciones, ordenamiento y los diversos vertimientos del recurso hídrico. Aplicando estas disposiciones generales, a las diferentes autoridades ambientales, a los generadores de vertimientos y a los encargados de la prestación del servicio público domiciliario de alcantarillado.<sup>47</sup>

También se establece que el proceso de ordenamiento del recurso hídrico deberá ser elaborado por la autoridad ambiental competente, mediante criterios de priorización con el objetivo de generar una clasificación de las aguas subterráneas, superficiales y marinas. Estableciendo su destino a los diferentes métodos de implementación y a sus respectivas medidas de aprovechamiento.

Seguidamente, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial realizará el proceso de expedición de la guía nacional de modelación del recurso hídrico, teniendo en cuenta los insumos aportados por el Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM).

---

<sup>46</sup> DECRETO 1594 DE 1984. Disponible en: [https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto\\_1594\\_de\\_1984.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_1594_de_1984.pdf)

<sup>47</sup> DECRETO 3930 DE 2010. Disponible en: [https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2010/dec\\_3930\\_2010.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2010/dec_3930_2010.pdf)

El proceso de ordenamiento del recurso hídrico se realizará mediante una declaratoria de ordenamiento, un diagnóstico, una identificación de los potenciales usos del recurso y una elaboración del plan de ordenamiento del recurso hídrico basado en inventarios de usuarios, clasificación de cuerpos de agua, criterios de calidad, objetivos de calidad y metas de reducción de cargas contaminantes, entre otros.<sup>48</sup>

- **Resolución 0631 de 2015**

Determina los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a diferentes cuerpos de agua superficiales y a sistemas de alcantarillado público. Su importancia radica en que es mucho más exigente que el Decreto 1594 de 1984 y define de manera específica los valores máximos permisibles para los vertimientos del sector hidrocarburos.<sup>49</sup>

A su vez, se establecen los diversos parámetros objeto del proceso de análisis y reporte, a través de las actividades industriales, comerciales o de servicios. Seguidamente se aplican disposiciones, a los diferentes vertimientos puntuales de aguas residuales, donde el proceso de captación y descarga se realice en el mismo cuerpo de agua y donde se evidencie presencia de materiales radioactivos o radioisótopos en los vertimientos, estableciéndose parámetros límites máximos de temperatura y zona de mezcla térmica.

Se establecen parámetros de carácter microbiológico para el análisis y reporte en el proceso de vertimiento puntual de aguas residuales (ARD y ARnD) a cuerpos de agua superficiales, realizándose la toma de muestras de manera simultánea a la respectiva caracterización de los vertimientos puntuales.<sup>50</sup>

---

<sup>48</sup> Ibid., p. 4.

<sup>49</sup> RESOLUCIÓN 0631 DEL 17 DE MARZO DE 2015. [En línea]. [Marzo 2020]. Disponible en: [https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res\\_631\\_marz\\_2015.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf)

<sup>50</sup> Ibid., p. 6.

Se determinan los respectivos parámetros en relación a los ingredientes activos de plaguicidas en categorías toxicológicas y sus correspondientes valores límites máximos permisibles en vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas a cuerpos de agua superficiales y alcantarillado público.

Seguidamente, se establecen los diferentes parámetros fisicoquímicos, junto con sus determinados valores límites máximos permisibles, de los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas generados mediante el proceso de desarrollo de actividades industriales, comerciales o de servicios y de las aguas residuales generadas a través de prestadores de servicios públicos de alcantarillado a cuerpos de agua superficiales. Teniendo en cuenta, el respectivo monitoreo de los diferentes vertimientos dados por diversas actividades productivas en el sector de la agroindustria y la ganadería, en el sector de la minería, en el sector de hidrocarburos, así como actividades asociadas en la obtención de productos alimenticios y bebidas, actividades de fabricación y manufactura de bienes, actividades asociadas con servicios y otras actividades de diferentes categorías.<sup>51</sup>

Finalmente se establecen disposiciones finales basadas en la exclusión de parámetros de la caracterización, en el proceso de recopilación de información obtenida por los resultados de los parámetros, en el régimen de transición, anexos y vigencia.

Actualmente no ha entrado en vigencia, porque se estableció un período de transición para dar tiempo al sector regulado de hacer los ajustes tecnológicos y de proceso, necesarios para el cumplimiento de la norma.

---

<sup>51</sup> *Ibíd.*, p. 8.

### 3. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS CRÍTICOS DE SELECCIÓN

#### 3.1 RIESGO MEDIOAMBIENTAL

A nivel ambiental, son muchos los parámetros críticos que generan un riesgo potencial en la vida del ser humano y en los diferentes ecosistemas, al ser altamente tóxicos y contaminantes. Muchos de estos compuestos presentan regulaciones y limitantes de exposición mucho mayores al presentar mayor nivel de contaminación que los demás.

Parámetros críticos como fenoles, cloruros, hidrocarburos y metales pesados, son consolidados como los de mayor índice de impacto potencial sobre el medio ambiente al presentar altos niveles de toxicidad y un bajo nivel de degradación biológica debido a su elevada complejidad estructural.

Diferentes parámetros considerados como críticos a nivel ambiental, presentaron variaciones en sus límites máximos permisibles establecidos en el decreto 1594 de 1984 anteriormente vigente con respecto a la resolución 0631 del 2015 del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible a entrar en vigencia, debido a la elevada medida de toxicidad y contaminación que presentan. A su vez, otros parámetros críticos fueron incluidos, al no presentar una regulación óptima requerida a nivel medio ambiental en el decreto anteriormente vigente.<sup>52</sup>

En el caso de metales pesados, se dieron diferentes modificaciones en su límite máximo permisible según el nivel de contaminación que representa cada compuesto en específico. El Arsénico presentó una variación de 0.5 mg/L a 0.1 mg/L, siendo su nuevo valor límite máximo permisible más regulado debido a su elevada toxicidad en las aguas. La medida regulatoria del cobre varió de 3 mg/L a 1 mg/L, la del mercurio fue modificada de 0.02 mg/L a 0.01 mg/L, la del níquel presentó su variación de 2 mg/L a 0.5 mg/L y el plomo de 0.5 mg/L a 0.2 mg/L. Estas y otras

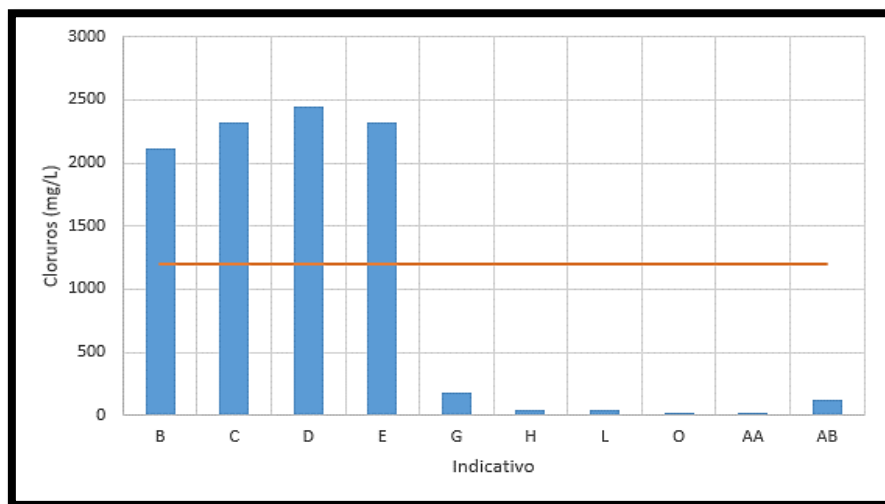
---

<sup>52</sup> BARRERA AMOROCHO, Andrea verónica y BERMEJO PEÑA, Andrés Felipe. Análisis del cumplimiento de los vertimientos de las aguas residuales asociadas a la perforación y producción en campos ubicados en los departamentos del meta y Casanare durante los años 2015 al 2017, según la resolución 0631 del 2015. 2018

variaciones, con el objetivo de establecer una medida más regulatoria y un mayor control en las diferentes aguas de producción generadas en la industria petrolera. En el caso de los fenoles como parámetro crítico se mantuvo su límite máximo permisible de concentración en 0.2 mg/L, al estar presente una óptima regulación en sus niveles de exposición en las aguas.

Los cloruros y los hidrocarburos totales fueron parámetros de inclusión en la nueva reglamentación debido a su alta medida de toxicidad evidenciada en niveles elevados de concentración, con un límite máximo en exposición establecido. En el caso de los cloruros su nuevo límite máximo permisible es de 1200 mg/L y el de hidrocarburos totales de 10 mg/L, regulando específicamente sus niveles de concentración en las aguas.<sup>53</sup>

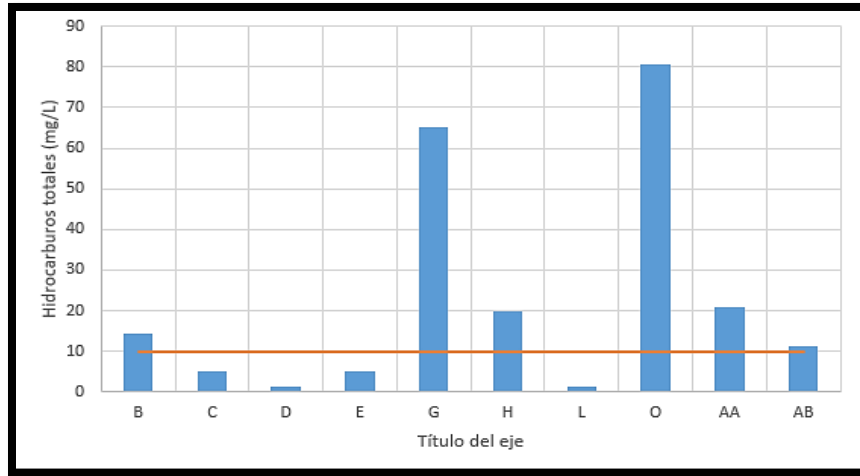
Figura 1. Análisis del cumplimiento de cloruros en campos en etapa de producción.



Fuente. Barrera Amoroch, Andrea verónica y Bermejo Peña, Andrés Felipe. Análisis del cumplimiento de los vertimientos de las aguas residuales asociadas a la perforación y producción en campos ubicados en los departamentos del meta y Casanare durante los años 2015 al 2017, según la resolución 0631 del 2015. 2018

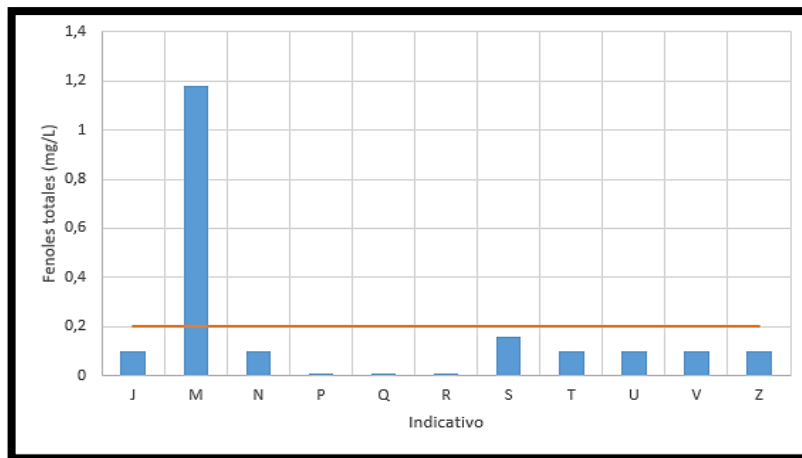
<sup>53</sup> *Ibíd.*, p. 46.

Figura 2. Análisis del cumplimiento de hidrocarburos totales en campos en etapa de producción.



Fuente. Barrera Amorocho, Andrea verónica y Bermejo Peña, Andrés Felipe. Análisis del cumplimiento de los vertimientos de las aguas residuales asociadas a la perforación y producción en campos ubicados en los departamentos del meta y Casanare durante los años 2015 al 2017, según la resolución 0631 del 2015. 2018

Figura 3. Análisis del cumplimiento de fenoles totales en campos en etapa de exploración.



Fuente. Barrera Amorocho, Andrea verónica y Bermejo Peña, Andrés Felipe. Análisis del cumplimiento de los vertimientos de las aguas residuales asociadas a la perforación y producción en campos ubicados en los departamentos del meta y Casanare durante los años 2015 al 2017, según la resolución 0631 del 2015. 2018

En las gráficas 1, 2 y 3, se evidencia que parámetros como cloruros, hidrocarburos totales, fenoles y metales pesados, en la etapa de producción presentan valores críticos al no cumplir con la reglamentación establecida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Siendo necesario implementar tecnologías para su óptima remoción, con el fin de cumplir la nueva normatividad.<sup>54</sup>

### **3.2 MÉTODOS CONVENCIONALES DE REMOCIÓN Y COSTOS OPERACIONALES**

Diferentes procesos de eliminación mediante métodos convencionales como la extracción con disolventes, incineración, aeración, adsorción en carbón activado, separación con membranas, fotólisis y proceso de oxidación avanzada en el caso de los fenoles, presentan un bajo porcentaje de remoción permaneciendo latente el alto grado de toxicidad en las aguas a pesar de su respectivo tratamiento.

De manera particular el método de extracción con solventes, a pesar de ser económico y efectivo, genera un problema de contaminación debido a que presenta grandes pérdidas de solventes en su implementación evidenciando remanentes de fenol en altas concentraciones luego de su proceso de remoción. De igual forma, el proceso de oxidación avanzada, promueve la formación de productos peligrosos y presenta elevados costos en su operación. En el caso del proceso de separación con membranas, los residuos deben ser tratados con anterioridad creando una protección óptima contra las cargas excesivas de sólidos en suspensión, niveles altos de pH y trazas de aceites y grasas presentes durante su implementación.<sup>55</sup>

En el caso de los metales pesados, métodos de tratamiento convencional como la precipitación química, la coagulación, el intercambio iónico y la adsorción presentan altos costos operativos, baja selectividad, altas caídas de presión y necesidad de tratamientos posteriores, dificultando un proceso de tratamiento eficiente.

---

<sup>54</sup> *Ibid.*, p. 56.

<sup>55</sup> VELASCO GÓMEZ, Op. Cit., p. 11.

La precipitación química, de manera particular a pesar de presentar una operación simple, genera lodos y costos extra en el proceso de tratamiento de lodos generados. A su vez, el método de coagulación genera incrementos en la producción de lodos y requerimientos de tratamientos posteriores. Métodos de intercambio iónico presentan elevados costos en la parte operativa y en el proceso de regeneración de membranas implementadas. En el caso del proceso de adsorción, a pesar de tener fáciles condiciones de operación, evidencia una baja selectividad, altas caídas de presión, crecimiento prolongado de bacterias, dificultad en la regeneración de sitios porosos y formación de productos residuales.<sup>56</sup>

En el caso de los hidrocarburos procesos de tratamientos convencionales biológicos, físico-químicos y térmicos, presentan diferentes limitaciones en su método de remoción. En el caso de procesos biológicos, la biorremediación requiere mayores tiempos de tratamiento debido a su baja solubilidad en agua, baja biodisponibilidad, restricción de nutrientes y a la presencia de diversos factores capaces de inhibir el proceso de degradación, haciendo necesario establecer niveles de toxicidad en los compuestos intermedios y productos.

Los procesos físico-químicos a pesar de presentar una alta efectividad en costos y tiempos de operación, requieren implementar tratamientos posteriores a los diferentes residuos generados mediante técnicas de separación, incrementando costos ya establecidos y haciendo necesaria la generación de permisos. A su vez, los diversos fluidos producto de la extracción pueden ocasionar un aumento en la movilidad de los contaminantes, requiriendo utilizar sistemas de recuperación.<sup>57</sup>

En el caso de los métodos térmicos, sus limitaciones se dan debido a sus altos costos operacionales, que aumentan de forma progresiva en función de la

---

<sup>56</sup> CAVIEDES RUBIO, Diego Ivan. Treatments for Removal of Heavy Metals Commonly Found in Industrial Wastewater. A Review. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5432290.pdf>

<sup>57</sup> SUAREZ BELTRAN, Roland Mauricio. Guía de métodos de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10607/TRABAJO%20FINAL%20cd.pdf?sequence=1>

implementación de energía y equipos, requiriendo altas inversiones en mano de obra y capital.

En el caso de los cloruros, procesos de tratamiento convencional como la inyección, electrodiálisis, evaporación, ósmosis inversa e intercambio iónico presentan diferentes limitaciones como métodos de remoción. De manera particular el proceso de electrodiálisis requiere y consume elevadas cantidades de energía para generar la corriente necesaria a implementar en el proceso de purificación y bombeo de agua a través del sistema. A su vez, presenta restricciones en aguas con contenido de cloruros mayores a 5000 mg/L debido a su elevado requerimiento de cambios de membranas y resinas y al alto gasto de energía implementado en el proceso. En el caso de la evaporación térmica, a pesar de ser un método altamente efectivo en el proceso de remoción, los excesivos costos de energía requeridos para su desarrollo lo convierten en un método totalmente inviable económicamente. De igual manera, métodos de evaporación mecánica presentan altas restricciones en volumen consolidándolo como un método poco práctico.<sup>58</sup>

En el método de remoción de cloruros por ósmosis inversa, a pesar de su alta capacidad de remoción y su bajo requerimiento en espacio para su implementación, se presentan diversas limitaciones debido a los altos costos generados en el proceso de reducción de pH en el agua, dado mediante tratamientos alcalinos posteriores que se deben implementar para mantener las medidas regulatorias de pH. A su vez, durante el proceso volumétrico se deben realizar pretratamientos con el fin de generar una optimización en el proceso y mantenimientos constantes en las membranas de forma preventiva, con el fin de evitar una disminución en la eficiencia del sistema.

De manera particular, el método de remoción de cloruros dado a través del proceso de intercambio iónico a pesar de tener altas eficiencias de remoción, una fácil automatización, estabilidad y facilidad de regeneración, presenta limitantes debido

---

<sup>58</sup> JARAVA GALVÁN y PLANETA BARROS, Op. Cit., p. 32.

a aumentos significativos en los costos, dados por la alta cantidad de regenerantes requeridos en planta. De igual forma, el método de remoción por intercambio iónico presenta restricciones al ser un proceso sucio con efluentes alcalinos y ácidos, debido a que implementar mejores parámetros físico-químicos requiere de tratamientos de mayor costo; y al no presentar eliminación de bacterias, sustancias orgánicas y pirógenos de forma efectiva, requiere mayores gastos en los sistemas de post tratamiento, generando de forma paralela mayores costos de producción en altas tasas de alimentación.<sup>59</sup>

Es por esto, que se hace necesario desarrollar e implementar un nuevo método de remoción como la nanotecnología con el fin de incrementar el porcentaje de remoción, disminuyendo significativamente los costos operacionales y permitiendo que muchos campos petroleros den cumplimiento a la nueva reglamentación establecida por la resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

---

<sup>59</sup> *Ibíd.*, p. 34.

## 4. NANOMATERIALES QUE PRESENTAN REMOCIÓN DE PARÁMETROS CRÍTICOS A NIVEL AMBIENTAL

### 4.1 NANOPARTÍCULAS DE TiO<sub>2</sub> Y MgO

Las nanopartículas descomponen los compuestos tóxicos químicamente de forma irreversible, inhibiendo cualquier posibilidad de desorción de los diferentes agentes capturados. Los materiales producto de la descomposición, evidencian un nivel de toxicidad menor o un carácter no tóxico con forma sólida en su estructura, siendo fáciles de desechar.<sup>60</sup>

**4.1.1 Generalidades del TiO<sub>2</sub>.** El dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) es un material semiconductor con propiedades fotoconductoras y fotocatalíticas. Es considerado uno de los óxidos con más alto impacto en el proceso de degradación de azo-colorantes, en el proceso de oxidación de compuestos orgánicos volátiles (COVS) y en el proceso de degradación de compuestos orgánicos clorados, entre otros. Presenta diferentes características en textura y estructura, junto con su cristalinidad, siendo de gran importancia en el desarrollo de procesos catalíticos. La eficiencia dada mediante reacciones fotocatalíticas, es inducida de manera aparente por un área específica y para el TiO<sub>2</sub> es inducida a través de la estabilización de su fase anatasa.<sup>61</sup>

El TiO<sub>2</sub> es el material semiconductor con más alta resistencia a procesos de corrosión química y fotocorrosión. A su vez, mediante sus características propias, puede obtener beneficios de los rayos ultravioleta naturales a pesar de su poco aprovechamiento de espectro solar en procesos fotocatalíticos. El dióxido de titanio al contrario de otras partículas semiconductoras que implementan mayores fracciones de espectro solar, no presenta degradación en los ciclos catalíticos consecutivos dados a través de fotocatalisis heterogéneas.

---

<sup>60</sup> VELASCO GÓMEZ, Op. Cit., p. 27.

<sup>61</sup> *Ibíd.*, p. 30.

El TiO<sub>2</sub> fue empleado por Gil en el año 2002 como catalizador en forma acuosa en suspensión en un reactor de forma tubular con el fin de fotodegradar el fenol. En este proceso se logró disminuir los niveles de concentración del fenol en un 95% a partir de una concentración de 1000 mg/L, siendo esto una evidencia tangible del alto grado de mineralización del fenol obtenido en medio acuoso mediante la implementación de procesos de degradación fotocatalítica a través del TiO<sub>2</sub>.<sup>62</sup>

Por lo tanto, implementar suspensiones irradiadas de TiO<sub>2</sub> es altamente útil en procesos de degradación de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales.

#### **4.1.2 Proceso de remoción de fenol con turba y nanopartículas de TiO<sub>2</sub> y MgO.**

El proceso de remoción de fenol se da mediante sistemas de biofiltración empacados con material orgánico, a través del depósito y formación de bacterias, favoreciendo la degradación del contaminante. Una fuente de carbono, energía y diferentes nutrientes son empleados para el desarrollo y conservación de los microorganismos. La dosis óptima de nanomaterial a implementar en los sistemas de biofiltración, es determinada mediante pruebas de jarras analizando DQO y fenol.<sup>63</sup>

Los sistemas de biofiltración son configurados de forma cilíndrica con capacidades de 1 L y empacados con turba humedecida al 70% como material orgánico, proporcionando estructura a la turba mediante su proceso de expansión, con el fin de beneficiar la colonización de los diferentes microorganismos. De forma adicional, se añadió al proceso, un nanomaterial compuesto por TiO<sub>2</sub> y MgO a diferentes concentraciones.

Los biofiltros son empleados mediante el análisis de su comportamiento hidrodinámico a través de pruebas de vaciado, con el fin de obtener una fórmula descriptiva del comportamiento del biofiltro, para el cálculo del tiempo de retención

---

<sup>62</sup> *Ibíd.*, p. 30.

<sup>63</sup> *Ibíd.*, p. 34.

hidráulico (TRH). La constitución del empaque de los biofiltros se da a través de 2 capas, una inferior constituida por grava dando soporte y reten a la capa intermedia, compuesta por un medio filtrante.

El proceso de remoción se da mediante la introducción del influente por medio de goteo en la parte superior del biofiltro. Posteriormente, el influente logra ser infiltrado de forma paulatina sobre la cama de la turba, permitiendo así la depuración del contaminante y saliendo el agua ya tratada por la parte inferior. Las mejores eficiencias alcanzadas fueron a un nivel de concentración de 563 mg/L de fenol, teniendo remociones mayores al 96% de fenol y DQO para los biofiltros de 1L de capacidad.<sup>64</sup>

## **4.2 NANOPARTÍCULAS DE SiO<sub>2</sub> PARA LA REMOCIÓN DE HIDROCARBUROS**

**4.2.1 Generalidades del SiO<sub>2</sub>.** El dióxido de silicio es uno de los principales componentes de la arena, constituido por silicio y oxígeno. Sintéticamente puede ser producido por un proceso de hidrólisis en fase vapor generando sílice pirogénica y mediante un proceso de hidrólisis húmeda formando sílice precipitada.

Presenta un estado de agregación sólido y una variación en su colorimetría de transparente a blanco. A su vez, es una sustancia insoluble, inodora y con elevada capacidad de absorción, pudiendo ser utilizada en líquidos con altos valores de densidad.<sup>65</sup>

El dióxido de silicio genera afecciones en la salud, provocando silicosis la cual impide que el oxígeno llegue a la sangre. Estos efectos, pueden conducir a dificultades respiratorias y, por tanto, a la muerte.

---

<sup>64</sup> *Ibíd.*, p. 38.

<sup>65</sup> INFORMACIÓN TÉCNICA Y COMERCIAL DEL DIÓXIDO DE SILICIO. Disponible en: <https://www.cosmos.com.mx/wiki/dioxido-de-silicio-44mc.html>

El dióxido de sílice ha sido ampliamente utilizado en la obtención de nanocompuestos, con el fin de reducir costos operativos, aumentar la productividad y mejorar el proceso de funcionalización.

#### **4.2.2 Nanointermedios compuestos por SiO<sub>2</sub> funcionalizados con nanopartículas magnéticas para la remoción de Hidrocarburos.**

El proceso de remoción de hidrocarburos se da mediante la funcionalización de partículas de sílice a través de nanopartículas de magnetita en una relación de 5% p/p. Durante la preparación de los nanointermedios se realiza un secado de la sílice a una temperatura de 120 °C por un tiempo estimado de 2 horas, con el fin de eliminar trazas de humedad.<sup>66</sup>

Una solución acuosa de NH<sub>4</sub>OH y etanol es implementada en una relación de 8.5% y 46% v/v respectivamente, para la realización de pretratamiento del soporte. Este proceso de pretratamiento se da mediante agitación a 1500 rpm durante 1 hora a una temperatura de 25 °C, para una relación establecida de 4 ml de solución por gramo de material. Seguidamente, se dopa el soporte mediante la inclusión de nanopartículas de magnetita con un proceso de agitación bajo las mismas condiciones y medida de temperatura por 4 horas más. Al finalizar el proceso de agitación, se realiza un calentamiento de la suspensión a 150 °C con el fin de evaporar la solución acuosa.

De manera periódica se incluye etanol como agente de limpieza, con el fin de eliminar cualquier traza de NH<sub>4</sub>OH presente en el material. Finalmente se realiza el proceso de secado del nanomaterial ya funcionalizado durante 2 horas a una temperatura de 120 °C, eliminando trazas de humedad remanente en el proceso de funcionalización.<sup>67</sup>

---

<sup>66</sup> VILLEGAS, Juan P, et al. Crude oil removal from production water using nano-intermediates of a SiO<sub>2</sub> support functionalized with magnetic nanoparticles. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/319889980\\_Remocion\\_de\\_hidrocarburos\\_de\\_aguas\\_de\\_produccion\\_de\\_la\\_industria\\_petrolera\\_utilizando\\_nanointermedios\\_compuestos\\_por\\_SiO<sub>2</sub>\\_funcionalizados\\_con\\_nanoparticulas\\_magneticas](https://www.researchgate.net/publication/319889980_Remocion_de_hidrocarburos_de_aguas_de_produccion_de_la_industria_petrolera_utilizando_nanointermedios_compuestos_por_SiO2_funcionalizados_con_nanoparticulas_magneticas)

<sup>67</sup> Ibíd., p. 68.

Para el proceso de adsorción se utiliza una relación de volumen de solución y peso seco de adsorbente de 1 g/L, mediante un proceso de agitación a 200 rpm durante 24 horas con el fin de garantizar una adecuada adsorción, tomando alícuotas en rangos de tiempo de 5 minutos. Seguidamente, el nanointermedio funcionalizado y el crudo adsorbido son retirados de la solución mediante un proceso de centrifugado a 4000 rpm durante 5 minutos, empleando una centrífuga Hermle Z 306.

La cantidad adsorbida en mg/g es determinada mediante una fórmula de balance, teniendo en cuenta la concentración de hidrocarburo en el sobrenadante, calculada en el equilibrio. Los errores fueron calculados mediante una representación en barras por el método de Schultz.<sup>68</sup>

$$N_{ads} = \frac{C_i - C_e}{M}$$

Los diferentes procesos de descomposición del crudo adsorbido en el nanointermedio fueron realizados utilizando aire seco y nitrógeno bajo atmosferas oxidantes e inertes, respectivamente. La eficiencia generada en el proceso de funcionalización fue mayor al 90%, la cual fue estimada y corroborada mediante métodos gravimétricos. La caracterización de las nanopartículas de magnetita, del soporte de SiO<sub>2</sub> y del nanointermedio sintetizado, se realizó mediante microscopia electrónica de barrido y adsorción de N<sub>2</sub>.

El proceso de registro de la cantidad adsorbida fue realizado en función del tiempo para el nanointermedio y para cada uno de sus componentes de manera específica a un valor de pH de 7 y a una medida de temperatura de 25 °C.<sup>69</sup>

El nanointermedio sintetizado, evidencia una alta actividad catalítica en el proceso de descomposición de crudo previamente adsorbido mediante análisis termogravimétricos.

---

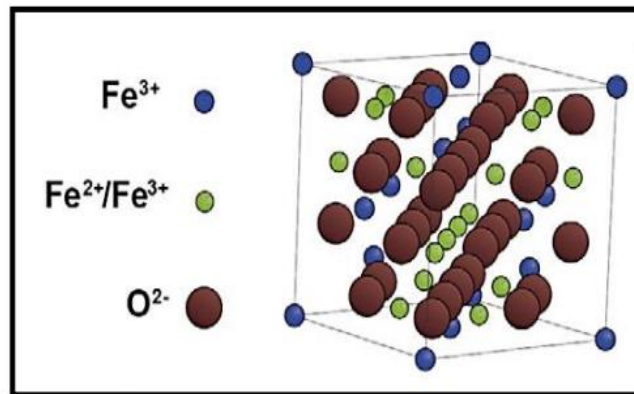
<sup>68</sup>. VILLEGAS, Juan P, et al. Crude oil removal from production water using nano-intermediates of a SiO<sub>2</sub> support functionalized with magnetic nanoparticles. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532017000300065](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532017000300065)

<sup>69</sup>. *Ibid.*, p. 6.

### 4.3 NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA

**4.3.1 Generalidades de la magnetita.** En el proceso de remoción de metales pesados, el óxido de hierro se posiciona como el de mayor aplicabilidad dentro de los óxidos metálicos. El óxido de hierro presenta en su estructura propiedades características como una amplia área superficial, una alta reactividad y afinidad hacia los metales pesados. A su vez, óxidos de hierro como la magnetita en escala nanométrica, evidencian propiedades superparamagnéticas.<sup>70</sup>

Figura 4. Estructura cristalina de la magnetita



Fuente: MARIMON BOLIVAR, Wilfredo. Ingeniería de nanopartículas magnéticas para la remoción de metales pesados en aguas. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/39649/Documento.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

La magnetita presenta en su estructura una configuración molecular tipo  $AB_2O_4$ , donde A representa el catión divalente y B representa el catión trivalente. La magnetita pertenece al grupo de espinelas clasificándose en un tipo de espinela inversa, al evidenciar en su estructura espacios tetraédricos ocupados por el ion trivalente, y espacios octaédricos ocupados por iones trivalentes y divalentes.

<sup>70</sup> MARIMON BOLIVAR, Wilfredo. Ingeniería de nanopartículas magnéticas para la remoción de metales pesados en aguas. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/39649/Documento.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

El hierro está constituido por electrones desapareados, permitiendo que la configuración de cristales formados mediante átomos de hierro, puedan presentar fuertes momentos magnéticos evidenciados en comportamientos ferromagnéticos, ferrimagnéticos o antiferrimagnéticos.

Estas características generan un tiempo de magnetización mayor al requerimiento de tiempo establecido para reversar el momento magnético de la partícula luego del proceso de magnetización, proporcionando así un comportamiento superparamagnético a las nanopartículas.<sup>71</sup>

**4.3.2 Métodos de síntesis de nanopartículas de magnetita.** El proceso de síntesis para la formación de nanopartículas se ha desarrollado mediante diferentes métodos convencionales como la co-precipitación, la síntesis hidrotermal, la descomposición térmica, microemulsiones, sol-gel, polioles, la sonoquímica y la mecanoquímica, con el fin de generar mejoras en el proceso de control de forma, estabilidad, monodispersión del tamaño y bio-compatibilidad. Adicionalmente se ha implementado el método de síntesis verde como una ruta para generar menos impactos a nivel ambiental en el proceso de obtención de nanopartículas.<sup>72</sup>

**4.3.2.1 Co-precipitación.** Este método presenta facilidad, economía y versatilidad en la producción de elevadas cantidades de material con variedad en composición y tamaño en el proceso de síntesis de nanopartículas de magnetita. Massart, es la primera referencia obtenida para este tipo de síntesis que es altamente reproducible en condiciones determinadas de temperatura, pH, relación molar entre iones férricos y tiempo de reacción, entre otros. Estas condiciones son determinadas, con el fin de evitar procesos de oxidación en los iones de hierro que generen producción de diferentes especies no deseadas como la maghemita y el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

---

<sup>71</sup> *Ibíd.*, p. 56.

<sup>72</sup> PICASSO, Gino. Synthesis of nanoparticles of magnetite by sol-gel and precipitation methods: study of chemical composition and structure. Disponible en: [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1810-634X2012000300003](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2012000300003)

El proceso de control sobre la forma, tamaño, propiedades magnéticas y cristalográficas es obtenido mediante variaciones de la naturaleza de iones de hierro, pH, índices de temperatura, materiales tensoactivos y fuerza iónica en la solución.<sup>73</sup>

**4.3.2.2 Síntesis hidrotermal.** Método utilizado en el proceso de síntesis de nanopartículas de magnetita en el cual se implementan soluciones acuosas de sales de hierro en condiciones de alta temperatura y alta presión. Su proceso de desarrollo se da en reactores o autoclaves en rangos de presión superiores a 2000 psi y niveles de temperatura superiores a 200 °C.

La síntesis hidrotermal no emplea solventes orgánicos y proporciona una tasa de rendimiento elevada de los productos con buenas características cristalográficas. A su vez, su fundamento es basado en una solución de partida constituida por una solución acuosa mixta de iones ferroso y férrico, para la formación de productos precipitados de hidróxido ferroso y goethita. Este tipo de síntesis presenta limitaciones debido a sus lentas velocidades de reacción y a su necesidad de pos procesamiento para la funcionalización de ligandos, como etapas de intercambio de superficie.<sup>74</sup>

**4.3.2.3 Descomposición térmica.** Este método consiste en la descomposición de precursores organometálicos en un disolvente de carácter no polar, con niveles de temperatura mayores a 200 °C, con el fin de formar partículas de óxido de hierro. Esta formación es desarrollada en 2 etapas. En la primera etapa se genera un proceso de nucleación donde a niveles de temperatura de 200 °C se evidencia formación de cristales semilla. En la etapa posterior se da el crecimiento de los núcleos en el nivel de temperatura de ebullición del disolvente empleado.

---

<sup>73</sup> *Ibid.*, p. 6.

<sup>74</sup> MARIMON BOLIVAR, *Op. Cit.*, p. 9.

Características como morfología y tamaño de las nanopartículas, pueden ser controladas mediante factores de temperatura, tiempos de reacción, concentración y proporción, naturaleza del disolvente, precursores y adición de semillas.<sup>75</sup>

**4.3.2.4 Microemulsiones.** Es un método de dispersión termodinámicamente estable y ópticamente transparente en el cual, dos líquidos inmiscibles son estabilizados mediante agentes tensoactivos. Este proceso de síntesis presenta bajos costos operativos, un mecanismo de fácil preparación y un mayor control de parámetros.

Las microemulsiones inhiben cantidades extra de agregación de las partículas, debido a que los materiales tensoactivos pueden ser adsorbidos sobre la superficie de la partícula cuando el tamaño de ésta se acerca a la fase polar. A su vez, presenta limitaciones debido a su baja solubilidad de sales inorgánicas en fases de carácter no polar, generando complicaciones durante el proceso de intercambio dinámico de reactivos a través de la fase continua del componente no polar.<sup>76</sup>

**4.3.2.5 Sol-gel.** Es un método que consiste en la hidrólisis y condensación de alcóxidos de metal o de precursores de alcóxido, con el fin de formar partículas de óxidos mediante la eliminación del solvente, para generar la formación del gel con el material deseado.

El alcóxido generado se desarrolla mediante un mecanismo de reacción directa o indirecta, entre el metal M y el alcohol ROH. Posteriormente en el proceso de hidrólisis, el grupo alcóxido es sustituido por un ligando hidróxido. Finalmente, se realiza un proceso de condensación, en el que se elimina el disolvente para la producción del óxido metálico. Para óptimas características del material, se deben tener en cuenta factores como velocidades de hidrólisis y condensación, composición de la solución, pH y temperatura, entre otros. Este método presenta limitantes debido a los altos costos de los precursores y a su enfoque en mayor

---

<sup>75</sup> *Ibid.*, p. 10.

<sup>76</sup> *Ibid.*, p. 11.

medida sobre sistemas no acuosos, generando un mayor índice de contaminación en la superficie de la partícula final.<sup>77</sup>

**4.3.2.6 Polioles.** Los polioles son alcoholes polihídricos empleados en el proceso de síntesis de nanopartículas magnéticas. En el desarrollo de este método se utiliza una disolución de sales precursoras, en el poliol en estado líquido. Seguidamente se realiza un proceso de mezclado y calentamiento a la disolución, con el fin de alcanzar el nivel de temperatura de ebullición del poliol y obtener así, una reducción de los iones metálicos.<sup>78</sup>

Los polioles son utilizados como agentes estabilizadores en el proceso de control de crecimiento de partículas y como mecanismo de prevención para evitar la agregación de partículas de tipo reductor. A su vez, la presencia de puntos de ebullición mayores a los del agua, genera reacciones a condiciones de temperatura más elevadas, proporcionando características cristalográficas de mejor calidad y distribuciones de tamaño inferior.

**4.3.2.7 Sonoquímica.** Es uno de los métodos más versátiles y competitivos, basado en la formación, crecimiento y colapso de burbujas en un medio líquido a causa de la cavitación acústica producida por el ultrasonido. En este proceso se emiten ondas ultrasónicas, con el fin de generar el colapso de burbujas implosivas y formar puntos calientes con un nivel de temperatura de 5000 K, rangos de presión de 1.000 atm y velocidades de enfriamiento en exceso de  $10^{10}$  K/s. La mayoría de estudios realizados para el proceso de síntesis de nanopartículas con sonoquímica, emplea el pentacarbonilo de hierro como precursor.<sup>79</sup> Comúnmente, las condiciones de operación se realizan en medios acuosos con tiempos de retención bajos, generando partículas con buena cristalinidad y magnetización.

---

<sup>77</sup> *Ibíd.*, p. 12.

<sup>78</sup> *Ibíd.*, p. 13.

<sup>79</sup> *Ibíd.*, p. 14.

**4.3.2.8 Mecanoquímica.** Este método emplea fuerzas de impacto y cizallamiento sobre materiales precursores, generando reducción en el tamaño de partícula y aumento de energía superficial del material. Estas condiciones, generan afecciones en las propiedades fisicoquímicas, superficiales y estructurales, formando un rompimiento de enlaces y producción de nuevas fases cristalinas.<sup>80</sup>

Las reacciones dadas en el proceso de obtención de nanopartículas, se realizan a través de reacciones anódicas por medio de liberación de electrones provenientes del acero, reacciones catódicas mediante la reducción de goethita y por medio de una formación final de magnetita.

**4.3.2.9 Síntesis verde.** El proceso de síntesis de nanomateriales mediante el método de síntesis verde, se da a través de la implementación de un agente acuoso, la elección de un agente reductor no agresivo a nivel ambiental y la utilización de diferentes estabilizantes de partículas con carácter no tóxico. La síntesis se realiza en niveles de temperatura ambiente, con tiempos de reacción de una hora, generando la obtención de materiales en un rango de tamaño de 80-100 nm.

Como precursores son empleadas las sales de hierro II y III mediante un proceso de reducción a través de carbohidratos obtenidos del extracto, formando una precipitación de magnetita a un nivel de temperatura de 80 °C. Los carbohidratos usados en el proceso generan como resultado la obtención de partículas en un tamaño de 4-8 nm y una elevada monodispersidad.<sup>81</sup>

---

<sup>80</sup> ZANELLA, Rodolfo. Metodologías para la síntesis de nanopartículas controlando forma y tamaño. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/325305624\\_Metodologias\\_para\\_la\\_sintesis\\_de\\_nanoparticulas\\_controlando\\_forma\\_y\\_tamano](https://www.researchgate.net/publication/325305624_Metodologias_para_la_sintesis_de_nanoparticulas_controlando_forma_y_tamano)

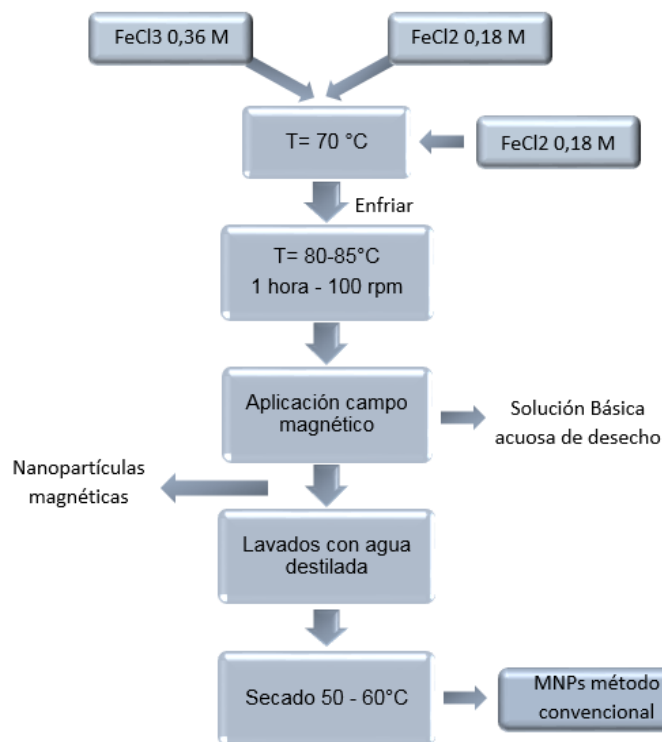
<sup>81</sup> ROBLES ARDILA, Diana Paola, RODRÍGUEZ PARDO, Natalia y PATAQUIVA MATEUS, Alis. Synthesis of magnetite nanoparticles using papaya peel extract for the azo dyes degradation in aqueous solutions. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/39649/Documento.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

### 4.3.3 Proceso de remoción de metales pesados con magnetita

#### 4.3.3.1 Síntesis de nanopartículas empleando el método de co-precipitación.

El proceso de síntesis de nanopartículas mediante el método de co-precipitación, implementa diferentes soluciones acuosas de cloruro férrico, a una concentración 0.36 M y cloruro ferroso a una concentración de 0.18 M. A las soluciones se les suministro calor a una temperatura de 70 °C. Seguidamente se realizó la adición de hidróxido de amonio en una cantidad de 9 ml, evidenciando una coloración negra como indicativo de la formación de magnetita.<sup>82</sup>

Figura 5. Síntesis convencional de MNPs.



Fuente: MARIMON BOLIVAR, Wilfredo. Ingeniería de nanopartículas magnéticas para la remoción de metales pesados en aguas. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/39649/Documento.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

<sup>82</sup> MARIMON BOLIVAR, Op. Cit., p. 32.

El proceso de síntesis se llevó hasta un nivel de temperatura de 80 °C, manteniéndose a un rango de 80 °C-85 °C durante 1 hora, junto con un proceso de agitación continua de 0-100 rpm.

Las nanopartículas fueron separadas por carga magnética, luego del proceso de enfriamiento a temperatura ambiente. Seguidamente se realizó el proceso de lavado empleando agua destilada y el proceso de secado mediante hornos, obteniendo como resultado una sustancia negra con aspecto gomoso.<sup>83</sup>

**4.3.3.2 Síntesis de nanopartículas con glutatión.** El proceso de síntesis de nanopartículas se realizó añadiendo una solución FeCl<sub>3</sub> en una concentración de 0.1 mol/L y en una cantidad de 10 ml, a un vaso precipitado de 100 ml, mediante un proceso de agitación mecánica a una temperatura de 75 °C. Seguidamente, en este nivel de temperatura se realizó la adición gota a gota de 20 ml de una solución acuosa de L-Glutatión, a 3 niveles diferentes de concentración de 0.1 mol/L, 0.214 mol/L y 0.3 mol/L en el vaso precipitado, con un valor de pH de la solución en estado de mezcla de 10.

La mezcla dada, se llevó a un proceso de calentamiento en niveles de temperaturas de 80 °C, 85 °C y 90 °C, junto con una agitación de 1 hora. De forma posterior, se realizó el proceso de separación de nanopartículas mediante aplicación de campos magnéticos. Finalmente, se llevaron a cabo varios procesos de lavado, empleando agua desionizada y alcohol, junto con el proceso de secado al vacío en un tiempo de 12 horas a una temperatura de 40 °C.<sup>84</sup>

En el proceso de síntesis de nanopartículas magnéticas, el glutatión actúa en forma de precursor y estabilizador. Su carácter precursor genera una alternativa eficaz en el proceso de producción de nanopartículas magnéticas, mediante una magnetización de saturación en una cantidad de 84.5 emu/g y una estabilidad coloidal de -35 Mv, a un valor de pH de 7 asociadas al potencial zeta.

---

<sup>83</sup> *Ibid.*, p. 32.

<sup>84</sup> *Ibid.*, p. 36.

Las nanopartículas sintetizadas mediante el método de glutatión, presentan un recubrimiento dado por una capa de grupos orgánicos como los -SH libres y los reactivos, permitiendo un mecanismo de acción efectivo en el proceso de adsorción de metales pesados presentes en aguas altamente contaminadas. De manera conjunta, se genera una reducción en la velocidad de oxidación y en la pérdida de magnetización del proceso de dispersión coloidal de nanopartículas magnéticas, debido al mecanismo de acción generado a través del recubrimiento superficial originado por el glutatión. Estas propiedades evidencian un uso potencial sostenible y seguro en la producción de nanopartículas magnéticas a través del proceso de síntesis, mediante la implementación de glutatión.

Durante el proceso, se obtuvo una reducción del 85% de la concentración inicial con un tiempo de adsorción de 60 minutos y una separación magnética con niveles mayores a 95%.<sup>85</sup>

#### **4.4 NANOPARTÍCULAS DE CeO<sub>2</sub> PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS**

Los estudios de adsorción para el proceso de remoción de metales pesados se realizaron, mediante la implementación de un análisis experimental de tipo factorial sistemático, en un rango de pH de 5 a 7, junto con niveles de concentración de metal de 1 a 10 mg/L y concentración de nanopartículas en un rango de 0.064 a 0.640 g/L.

Las nanopartículas de óxido de cerio fueron sintetizadas en un sistema de fase acuosa, empleando agua de grado milli-Q. Durante el proceso, se realizó la oxidación de iones de  $Ce^{+3}$  de la sal  $Ce(NO_3)_3$  a iones  $Ce^{4+}$ , a condiciones de pH neutro mediante la implementación de hexametilentetramina (HMT). Seguidamente, se realizó un proceso de precipitación y estabilización de los nanocristales de

---

<sup>85</sup> *Ibíd.*, p. 37.

dióxido de cerio, utilizando el mismo reactivo (HMT) con el fin de formar una doble capa eléctrica para evitar la aglomeración de nanopartículas.

Las respectivas mediciones de pH final se realizaron al terminar la fase de 24 horas, seguido de un proceso de centrifugación de muestras a un nivel de 10000 rpm, con el fin de obtener la separación de nanopartículas de la fase en estado líquido.<sup>86</sup>

Este tipo de nanopartículas presentan un bajo costo económico y una alta capacidad de adsorción, permitiendo eliminar metales en niveles bajos de concentración durante el tratamiento del agua. De igual forma, este proceso de remoción evidencia una alta efectividad en la adsorción de 3 tipos de metales pesados en sistemas multicomponentes.

De manera particular para el cadmio, la capacidad máxima de adsorción registrada fue de 93.4 mg de Cd<sup>2+</sup>/ g CeO<sub>2</sub> en sistemas multicomponentes a un nivel de pH de 7. Para el plomo su máxima capacidad de adsorción fue de 128.1 mg Pb<sup>2+</sup>/ g CeO<sub>2</sub> en un sistema multicomponente a un pH registrado de 5. Finalmente, para el cromo, su máxima capacidad de adsorción evidenciada fue de 34.4 mg Cr<sup>6+</sup>/ g CeO<sub>2</sub> en sistemas multicomponentes a un nivel de pH de 5.<sup>87</sup>

#### **4.5 NANOPARTÍCULAS DERIVADAS DEL CATECOL PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS**

El proceso de remoción de metales pesados mediante la implementación de nanopartículas derivadas del catecol en concentraciones variables, se da utilizando un diseño experimental de tipo factorial con variaciones en los niveles de metal y nanomaterial.

La síntesis de las nanopartículas se da mediante la adición de elevadas cantidades de amoníaco acuoso, en una relación 100:1 durante un proceso de agitación y en

---

<sup>86</sup> CONTRERAS A.R., et al. USE OF CERIUM OXIDE (CeO<sub>2</sub>) NANOPARTICLES FOR THE ADSORPTION OF DISSOLVED CADMIUM (II), LEAD (II) AND CHROMIUM (VI) AT TWO DIFFERENT pHs IN SINGLE AND MULTI-COMPONENT SYSTEMS. Disponible en: [https://journal.gnest.org/sites/default/files/Submissions/gnest\\_01687/gnest\\_01687\\_published.pdf](https://journal.gnest.org/sites/default/files/Submissions/gnest_01687/gnest_01687_published.pdf)

<sup>87</sup> *Ibíd.*, p. 3.

presencia de aire, a una concentración en solución de 4 heptadecilcatecol (0.2%, p/v) en metanol y a un nivel de temperatura de 40 °C.<sup>88</sup> El proceso de síntesis se llevó a cabo en un tiempo de 24 horas, evidenciando formación de partículas sólidas con tamaños en diámetro de 100 a 350 nm, durante el proceso de caracterización morfológica a través de SEM y TEM obtenida del medio de reacción.

Las mediciones por microscopía electrónica de barrido (SEM) se realizaron a través de muestras preparadas mediante el vertimiento de una gota de la dispersión a evaluar sobre cinta de aluminio, junto con una evaporación adicional del disolvente a niveles de temperatura ambiente.

La solubilidad y estabilidad de las nanopartículas derivadas del catecol se determinaron en varios topes, con el fin de simular diferentes condiciones a nivel biológico. Durante el proceso, las capacidades de adsorción más altas fueron obtenidas en niveles de concentración bajos de adsorbente y concentraciones altas de metal.

Los porcentajes de remoción obtenidos durante el proceso, mediante la implementación de nanopartículas derivadas del catecol como adsorbentes, fueron de 94% para el cadmio y 91% para el plomo.<sup>89</sup>

---

<sup>88</sup> CONTRERAS RODRÍGUEZ, Ada Rebeca, et al. Biocompatible polydopamine-like particles for the removal of heavy metals at extremely low concentrations. Disponible en: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/RA/C6RA03664C#!divAbstract>

<sup>89</sup> *Ibíd.*, p. 4.

## 5. ANÁLISIS SISTEMÁTICO DE NANOMATERIALES QUE PRESENTAN CASOS DE ÉXITO EN LA REMOCIÓN DE PARÁMETROS CRÍTICOS A NIVEL AMBIENTAL

Mediante el análisis sistemático de literatura técnica se encontraron diferentes nanomateriales con alta selectividad a cierto tipo de contaminantes y otros con amplios rangos de aplicación en el proceso de remoción de parámetros críticos a nivel ambiental en sistemas multicomponentes de aguas residuales.

Tabla 3. Nanomateriales que presentan casos de éxito en la remoción de parámetros críticos a nivel ambiental

PARAMETRO DE REMOCIÓN	NANOMATERIAL	NIVEL DE REMOCIÓN
FENOL	Turba y nanopartículas de TiO <sub>2</sub> y MgO	96%
METALES PESADOS	Nanopartículas de magnetita	95%
METALES PESADOS	Nanopartículas derivadas del catecol	94% cadmio 91% plomo
METALES PESADOS	Nanopartículas de CeO <sub>2</sub>	93.4 mg de Cd <sup>2+</sup> / g CeO <sub>2</sub> 128.1 mg Pb <sup>2+</sup> / g CeO <sub>2</sub> 34.4 mg Cr <sup>6+</sup> / g CeO <sub>2</sub>
HIDROCARBUROS	Nanointermedios compuestos por SiO <sub>2</sub> funcionalizados con nanopartículas magnéticas	>90%
CLORUROS	-	-

Fuente: “Elaboración propia”

En la tabla 3, se evidencia la clasificación de los diferentes nanomateriales encontrados en el estudio, según el parámetro crítico a nivel ambiental a evaluar y el porcentaje de remoción obtenido en el proceso.

En cuanto al proceso de remoción de metales pesados, es posible evidenciar que las nanopartículas derivadas del catecol presentan alta selectividad al remover solo 2 tipos de contaminantes de las aguas residuales, generando limitantes al momento de realizar tratamientos de aguas de producción con un sistema multicomponente de metales pesados en su composición. De igual forma, las nanopartículas de  $\text{CeO}_2$  en el proceso de remoción de metales pesados presentes en aguas residuales, evidencian una alta selectividad hacia metales como el cromo, el plomo y el cadmio, restringiendo en gran medida su nivel de aplicación.

Por otro lado, las nanopartículas obtenidas a partir de magnetita presentan un amplio rango de aplicación en la remoción de diferentes metales pesados como el cadmio, el plomo, el cromo, el mercurio y el arsénico, siendo altamente funcionales en el tratamiento de aguas residuales.

De manera particular, las nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{MgO}$  funcionalizadas con turba presentan una alta efectividad en la remoción de fenoles, alcanzando una remoción porcentual del 96% del fenol presente en las aguas residuales.

En el caso de los hidrocarburos como parámetro crítico de remoción a nivel ambiental, los nanointermedios compuestos por  $\text{SiO}_2$  funcionalizados con nanopartículas magnéticas presentan niveles de remoción mayores al 90%, siendo altamente funcionales en el tratamiento de aguas de producción.

Por tanto, los nanomateriales obtenidos a partir de magnetita, las nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{MgO}$  funcionalizadas con turba humedecida y los Nanointermedios compuestos por  $\text{SiO}_2$  funcionalizados con nanopartículas magnéticas, al presentar un bajo nivel de selectividad y un amplio rango de aplicación, son los que evidencian la más alta funcionalidad en el tratamiento de aguas de producción de campos petroleros.

## 6. APLICABILIDAD DE NANOMATERIALES EN CAMPOS DE LA ORINOQUÍA COLOMBIANA

Mediante la recopilación de informes obtenidos por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), se obtuvo información que permite evidenciar el estado de cumplimiento de la Resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, de campos de la Orinoquía Colombiana, en cuanto a niveles de concentración dados en los diferentes vertimientos en cuerpos de agua superficiales.<sup>90</sup>

Para evaluar la aplicabilidad de los nanomateriales estudiados, se eligieron 3 campos petroleros, analizando sus diferentes especificaciones en cuanto a límites máximos permisibles, con el fin de determinar su cumplimiento en medidas de concentración de los diferentes parámetros establecidos como críticos a nivel ambiental, según la reglamentación dada por la Resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Los campos Quifa mediante el pozo Qf 523H, el campo Dorotea B1 y el campo Rancho hermoso, fueron los campos empleados para el estudio. En las tablas 4 y 5, se establecen las generalidades de los campos de estudio y los diferentes niveles de concentración de parámetros críticos de vertimientos en cuerpos de agua superficiales.

Tabla 4. Generalidades de los campos Dorotea, Quifa y Rancho Hermoso

PROYECTO	CAMPO	UBICACIÓN	EMPRESA OPERADORA	FLUIDO PRODUCIDO
Área de Explotación de hidrocarburos Quifa	Quifa	Puerto Gaitán- Meta	Meta Petroleum CORP	Crudo

<sup>90</sup> BARRERA AMOROCHO, Andrea verónica y BERMEJO PEÑA, Andrés Felipe. Análisis del cumplimiento de los vertimientos de las aguas residuales asociadas a la perforación y producción en campos ubicados en los departamentos del meta y Casanare durante los años 2015 al 2017, según la resolución 0631 del 2015. 2018

PROYECTO	CAMPO	UBICACIÓN	EMPRESA OPERADORA	FLUIDO PRODUCIDO
Área de Desarrollo Dorotea	Dorotea	Puerto Gaitán-Meta	New Granada Energy Corporation	Crudo y gas
Campo de Explotación Rancho Hermoso	Rancho Hermoso	Orocué-Casanare	Canacol Energy Colombia S.A	Crudo y gas

Fuente: “Elaboración propia”

Tabla 5. Niveles de concentración de parámetros críticos ambientales de vertimientos en cuerpos de aguas superficiales.

CAMPO	FENOLES (mg/L)	CLORUROS (mg/L)	HIDROCARBUROS TOTALES (mg/L)	ARSÉNICO (mg/L)	CROMO (mg/LO2)	CADMIO (mg/L)	PLOMO (mg/L)
QUIFA	1.18	225	0.394	<0.0025	<0.04	<0.010	<0.1
DOROTEA	-	2110	14,2	0,00056	-	-	-
RANCHO HERMOSO	-	182.7	65.31	-	<0.005	<0.003	<0.006

Fuente: “Elaboración propia”

Según los registros de vertimientos en cuerpos de agua superficiales, el campo Quifa Qf 523H presentaría incumplimiento en la Resolución 0631 del 2015 debido a su contenido en fenoles de 1.18 mg/L que supera excesivamente su valor límite máximo permisible establecido de 0.12 mg/L.

Como medida alternativa de cumplimiento, se aconseja implementar nanotecnología mediante un proceso de remoción con turba y nanopartículas de TiO<sub>2</sub> y MgO, obteniendo porcentajes de remoción mayores al 96%. Para el campo Quifa QF 523H se obtendría una remoción mayor a 1.1328 mg/L, generando una nueva medida en concentración de fenol en las aguas de 0.0472 mg/L, dando

cumplimiento a la nueva normatividad establecida mediante la Resolución 0631 del 2015.

El campo Dorotea B1 por su parte presenta un alto contenido de Hidrocarburos totales, excediendo los valores límites máximos permisibles determinados en la Resolución 0631 del 2015 con un contenido en hidrocarburos totales de 14,2 mg/L. Los hidrocarburos como parámetros críticos presentan una concentración límite máxima permisible de 10 mg/L, evidenciando así un riesgo medioambiental al no cumplir con las medidas reglamentarias establecidas en aguas de producción.

Mediante el método de remoción de nanocompuestos de SiO<sub>2</sub> funcionalizados con nanopartículas magnéticas, se obtienen porcentajes de remoción mayores al 90%. De manera particular para el campo Dorotea B1, se generaría una remoción mayor a 12.78 mg/L, obteniendo una nueva medida en concentración de hidrocarburos totales < 1.42 mg/L, dando así cumplimiento al límite máximo permisible establecido de 10 mg/L.

A su vez, el campo Dorotea según los informes de cumplimiento ambiental, presentaría incumplimiento en el límite máximo permisible de cloruros, con un nivel de concentración de 2110 mg/L. Al ser su límite máximo permitido de 1200 mg/L y no contar con estudios de nanomateriales para su respectivo proceso de remoción, se hace útil implementar métodos alternativos como la ósmosis inversa y el intercambio iónico, obteniendo porcentajes de remoción del 90-95% y 90% respectivamente.

Mediante el método de intercambio iónico se obtendría un porcentaje de remoción de 90%, obteniendo una nueva medida en concentración de cloruros de 211 mg/L. De igual forma, con la implementación del proceso de ósmosis inversa se generaría una remoción porcentual del 90-95%, evidenciando una nueva medida en concentración en un rango de 211-105.5 mg/L. Estos métodos de tratamiento evidencian una alta capacidad remoción, reduciendo significativamente los niveles de concentración de cloruros presente en el agua residual y dando cumplimiento al valor límite máximo permisible establecido en la Resolución 0631 del 2015.

En el caso de Rancho hermoso, al superar el límite máximo permisible en concentración de hidrocarburos totales en aguas para vertimientos, se hace necesario implementar un método de remoción de nanopartículas con el fin de dar cumplimiento a la normatividad reglamentaria. Implementando un método de nanocompuestos de SiO<sub>2</sub> funcionalizados con nanopartículas de magnetita, se obtienen porcentajes de remoción mayores a 58,779 mg/L. Este método es altamente efectivo y genera una nueva medida en concentración de < 6,531 mg/L, dando cumplimiento al valor de referencia establecido en la Resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

A su vez, para campos petroleros con incumplimiento en varios parámetros críticos debido a sus elevadas concentraciones en las aguas, es altamente efectivo realizar un tren de remoción por medio de una malla donde se incluyan diferentes nanomateriales como las nanopartículas de TiO<sub>2</sub> y MgO, nanocompuestos de SiO<sub>2</sub> funcionalizados con nanopartículas magnéticas y nanopartículas de magnetita, como en el caso de Dorotea, con el fin de lograr una remoción completa de los diferentes contaminantes y dar cumplimiento a los parámetros de cumplimiento ambiental establecidos en la Resolución 0631 del 2015.

Tabla 6. Medidas de concentración post-tratamiento de parámetros críticos ambientales.

CAMPO	PARÁMETRO	MÉTODO	VALOR DE REFERENCIA	CONCENTRACIÓN INICIAL	CONCENTRACIÓN POST TRATAMIENTO
QUIFA	FENOLES	TURBA Y NANOPARTÍCULAS DE TIO <sub>2</sub> Y MGO	0.12 mg/L	1.18 mg/L	0.0472 mg/L
DOROTEA	HIDROCARBUROS	NANOCOMPUESTOS DE SIO <sub>2</sub> FUNCIONALIZADOS CON NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS	10 mg/L	14,2 mg/L	< 1.42 mg/L

CAMPO	PARÁMETRO	MÉTODO	VALOR DE REFERENCIA	CONCENTRACIÓN INICIAL	CONCENTRACIÓN POST TRATAMIENTO
RANCHO HERMOSO	HIDROCARBUROS	NANOCOMPUESTOS DE SIO2 FUNCIONALIZADOS CON NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS	10 mg/L	65.31 mg/L	6.53 mg/L
DOROTEA	CLORUROS	ÓSMOSIS INVERSA	1200 mg/L	2110 mg/L	105.5 mg/L
DOROTEA	CLORUROS	INTERCAMBIO IÓNICO	1200 mg/L	2110 mg/L	211 mg/L

Fuente: “Elaboración propia”

## 7. CONCLUSIONES

- Mediante la revisión sistemática de literatura técnica, no se encontró evidencia de casos de éxito del estudio de nanomateriales aplicados en el proceso de remoción de cloruros como parámetro crítico a nivel ambiental, por lo cual se hace necesario recurrir a otros métodos como el Intercambio iónico y la ósmosis inversa para dar cumplimiento a la Resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el tratamiento del agua residual de producción.
- Los nanomateriales obtenidos a partir de magnetita presentan la mayor efectividad en el proceso de remoción de metales pesados, al evidenciar bajos niveles de selectividad y porcentajes de remoción del 95% en sistemas multicomponentes de aguas de producción, con altos niveles de concentración de diferentes metales pesados como el cadmio, el plomo, el cromo, el mercurio y el arsénico en su composición.
- Los nanointermedios compuestos por SiO<sub>2</sub> funcionalizados con nanopartículas magnéticas demuestran ser una alternativa de tratamiento eficaz en la remoción de hidrocarburos, al generar medidas de concentración post-tratamiento para los campos de estudio Dorotea y Rancho hermoso dentro de los límites máximos permisibles establecidos con porcentajes de remoción mayores al 90%.
- Para el campo petrolero de estudio Dorotea, al presentar en varios parámetros críticos a nivel ambiental medidas de concentración mayores a las permitidas por la resolución 0631 del 2015 para generar vertimientos, se realizaron estimaciones de remoción para el tratamiento del agua residual mediante una combinación de nanointermedios compuestos por SiO<sub>2</sub> funcionalizados con nanopartículas magnéticas y un proceso de osmosis inversa, evidenciando medidas de concentración de hidrocarburos y cloruros post-tratamiento, dentro de los límites máximos permisibles establecidos por

la Resolución 0631 del 2015 con porcentajes de remoción del 90 y del 90-95% respectivamente.

- De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible afirmar que los nanomateriales implementados en los tres campos petroleros de estudio como métodos de tratamiento para la remoción de fenoles, hidrocarburos y metales pesados en aguas residuales, permitirían el cumplimiento de la Resolución 0631 del 2015 del Ministerio de ambiente y Desarrollo Sostenible, al evidenciar a partir de los porcentajes de remoción reportados en el estudio medidas de concentración post-tratamiento de fenoles, hidrocarburos y metales pesados dentro de los límites máximos permisibles establecidos.

## 8. RECOMENDACIONES

- Analizar la aplicabilidad de los nanomateriales de estudio como métodos de remoción para el tratamiento de aguas residuales de otros campos petroleros colombianos de diferentes regiones como el Magdalena medio, entre otros, que presenten incumplimiento a nivel ambiental según la normatividad establecida por la Resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Realizar pruebas de laboratorio con muestras de agua residual de diferentes campos petroleros colombianos, con el fin de evaluar de forma práctica los porcentajes de remoción de fenoles, cloruros, hidrocarburos y metales pesados obtenidos mediante la implementación de los nanomateriales analizados en este estudio.
- Establecer un tren de remoción de nanomateriales de forma experimental mediante combinación de métodos en el tratamiento de aguas residuales, para campos petroleros de diferentes regiones que presenten incumplimiento en varios parámetros críticos a nivel ambiental, según los límites máximos permisibles en concentración establecidos por la Resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

## BIBLIOGRAFÍA

- BARBA HO, Luz Edith. Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición. Universidad del valle, Cali, Colombia. 2002. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/conceptos.pdf>
- BARRERA AMOROCHO, Andrea verónica y BERMEJO PEÑA, Andrés Felipe. Análisis del cumplimiento de los vertimientos de las aguas residuales asociadas a la perforación y producción en campos ubicados en los departamentos del meta y Casanare durante los años 2015 al 2017, según la resolución 0631 del 2015. 2018.
- CONTRERAS RODRÍGUEZ, Alda Rebeca, et al. Biocompatible polydopamine-like particles for the removal of heavy metals at extremely low concentrations. 2016. Disponible en: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/RA/C6RA03664C#!divAbstract>
- DECRETO 1594 DE 1984. Disponible en: [https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto\\_1594\\_de\\_1984.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_1594_de_1984.pdf)
- DECRETO 1594 DE 1984. Usos del agua y residuos líquidos. Disponible en: [http://www.ideam.gov.co/documents/24024/36843/Dec\\_1594\\_1984.pdf/aacbcd5d-fed8-4273-9db7-221d291b657f](http://www.ideam.gov.co/documents/24024/36843/Dec_1594_1984.pdf/aacbcd5d-fed8-4273-9db7-221d291b657f)
- DECRETO 2811 DEL 18 DE DICIEMBRE DE 1974. Disponible en: [https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto\\_2811\\_de\\_1974.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_2811_de_1974.pdf)
- DECRETO 3930 DE 2010. Disponible en: [https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2010/dec\\_3930\\_2010.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2010/dec_3930_2010.pdf)

- ESPIGARES GARCÍA, M. y PÉREZ LÓPEZ, J. A. Aguas residuales. Composición. Disponible en: [http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas\\_Residuales\\_composicion.pdf](http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf)
- HURMAN, E.M. Organic Geochemistry of Natural Waters. Martinus Nijhoff. 1985
- IDEAM - INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Fenol 4.14. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018903/Links/Guia14.pdf>
- IMPACTO AMBIENTAL DE LOS HIDROCARBUROS Y RECUPERACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS. Disponible en: [https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/contaminacion-marina-accidental/impacto\\_ambiental.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/contaminacion-marina-accidental/impacto_ambiental.aspx)
- JARAVA GALVÁN, Rafael y PLANETA BARROS, Irlanda Patricia. Análisis de Alternativas para la Remoción de Cloruros presentes en las Aguas Residuales Industriales de Producción del Campo Cicuco Ecopetrol S.A. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/13789/1052040776.pdf?sequence=1&isAllowed=yhttps://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00045.pdf>
- LEY 9 DE 1979. Disponible en: [https://www.minsalud.gov.co/Normatividad\\_Nuevo/LEY%200009%20DE%201979.pdf](https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/LEY%200009%20DE%201979.pdf)
- LIZARAZO SALCEDO, Cesar Germán, et al. Nanomaterials: Being Closer to Basics. 2018. Disponible en: [http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0465546X2018000200109&lng=es&nrm=iso](http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0465546X2018000200109&lng=es&nrm=iso)

- MARIMON BOLIVAR, Wilfredo. Ingeniería de nanopartículas magnéticas para la remoción de metales pesados en aguas. 2018. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/39649/Documento.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- MAYORGA GARCÍA, Fernando. La industria petrolera en Colombia. Disponible en: <https://www.banrepcultural.org/biblioteca-virtual/credencial-historia/numero-151/la-industria-petrolera-en-colombia>
- MEDEL REYES, Alejandro. Incineración electroquímica de compuestos fenólicos en matrices complejas. Disponible en: <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/95/1/Interacci%C3%B3n%20electroqu%C3%ADmica%20de%20compuestos%20fen%C3%B3licos%20en%20matrices%20complejas..pdf>
- MEDINA M., Miguel E.; GALVÁN R., Luis E. y REYES G., Rosa E. Las nanopartículas y el medio ambiente. 2015.
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. 2014. P. 14
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631. (17, marzo, 2015).
- MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 3930 de 2010. Artículo 1.
- MOÑINO AGUILERA, Natàlia y GALDOS BALZATEGI, Ane. Exposición a la contaminación por actividad petrolera y estado de salud de la Comuna Yamanunka. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/4441/tesis.pdf?sequence=1>

- NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE CERIO PARA DESCONTAMINAR AGUAS CON VARIOS METALES PESADOS. 2016.  
Disponible en: <https://www.uab.cat/web/detalle-noticia/nanoparticulas-de-oxido-de-cerio-para-descontaminar-aguas-con-varios-metales-pesados-1345680342040.html?noticiaid=1345700075501>
- NMX-AA-073-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. 2001. Disponible en : <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2011/01/nmx-aa-073-scfi-2001.pdf>
- PARDO DÍAZ, Sergio, et al. Biodegradación de fenol en aguas tratadas de la industria petrolera para re-uso en cultivos agrícolas. Disponible en: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v65n2/0034-7744-rbt-65-02-00685.pdf>
- PICASSO, Gino. Synthesis of nanoparticles of magnetite by sol-gel and precipitation methods: study of chemical composition and structure. 2012.
- PITTMAN, E.D. & M.D. LEWAN. Organic Acids in Geological Processes. Springer-Verlag, Heidelberg 1994.
- PRTR ESPAÑA MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/Fenoles,15658,11,2007.html>
- RESOLUCIÓN 0631 DE 2015. Aliado en tecnología y calidad. Disponible en: <http://www.atcalsas.com/normatividad/page/norma/norma/resolucion-631-de-2015>
- RESOLUCIÓN 0631 DEL 17 DE MARZO DE 2015. Disponible en: [https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1res\\_631\\_marz\\_2015.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1res_631_marz_2015.pdf)
- RODRIGUEZ, V & LOPEZ, K. Análisis del cumplimiento de los vertimientos de las aguas residuales de perforación y producción en los campos de Santander durante el 2014-2016, según la Resolución 0631 del 2015. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2017. P. 36

- SERNA, Iveth, TORRES, Jesús y HOYOS, Bibian. Recuperación de fenol de aguas residuales industriales por tratamiento con NaCl. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/496/49613904.pdf>
- USE OF CERIUM OXIDE (CeO<sub>2</sub>) NANOPARTICLES FOR THE ADSORPTION OF DISSOLVED CADMIUM (II), LEAD (II) AND CHROMIUM (VI) AT TWO DIFFERENT pHs IN SINGLE AND MULTI-COMPONENT SYSTEMS. 2015. Disponible en: [http://journal.gnest.org/sites/default/files/Submissions/gnest\\_01687/gnest\\_01687\\_published.pdf](http://journal.gnest.org/sites/default/files/Submissions/gnest_01687/gnest_01687_published.pdf)
- USO DE NANOPARTÍCULAS DERIVADAS DEL CATECOL PARA ELIMINAR METALES PESADOS EN AGUAS DE CONSUMO. 2016 Disponible en: <https://www.uab.cat/web/detalle-noticia/uso-de-nanoparticulas-derivadas-del-catecol-para-eliminar-metales-pesados-en-aguas-de-consumo-1345680342040.html?noticiaid=1345704864934>
- VARGAS DOMINGUEZ, Jahir Oswaldo. Producción biológica de nanopartículas de óxido de silicio utilizando escombros procedentes de construcciones del área metropolitana de Bucaramanga. 2019. Disponible en: <https://repositorio.udes.edu.co/bitstream/001/1055/1/Producci%C3%B3n%20biol%C3%B3gica%20de%20nanopart%C3%ADculas%20de%20%C3%B3xido%20de%20silicio%20utilizando%20escombros%20procedentes%20de%20construcciones%20del%20%C3%A1rea%20metropolitana%20de%20Bucaramanga.pdf>
- VELASCO GÓMEZ, Yuridia. Sistemas de biofiltración empacados con turba y nanopartículas de TiO<sub>2</sub> y MgO para remoción de fenol. 2011. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/4441/tesis.pdf?sequence=1>