

The background of the cover is a map of Colombia. A large, irregularly shaped area in the center and right side of the map is highlighted with a bright yellow and orange glow, suggesting a specific region of interest, likely related to gold mining. The rest of the map is in a dark, muted green color.

# Contaminación y remediación de suelos en Colombia

## Aplicación a la minería de Oro

José Alejandro Martínez Sepúlveda  
Miguel Reinaldo Casallas



**Catalogación en la fuente: Biblioteca Universidad EAN**

Martínez Sepúlveda, José Alejandro

Contaminación y remediación de suelos en Colombia: aplicación a la minería de oro/ José Alejandro Martínez Sepúlveda, Miguel Reinaldo Casallas.

Descripción: 1a edición / Bogotá: Universidad EAN, 2018.

112 páginas

9789587565836 (Electrónico 2018)

1. Contaminación de suelos -- Colombia 2. Minas de oro -- Colombia  
3. Industria minera -- Colombia 4. Impacto ambiental -- Colombia

5. Metales pesados -- Colombia

I. Casallas, Miguel Reinaldo

628.55861 CDD23

**Edición**

Gerencia de Investigaciones

**Gerente de Investigaciones**

H. Mauricio Diez Silva

**Coordinadora de Publicaciones**

Laura Cediél Fresneda

**Revisor de estilo**

Sonia Sánchez Galindo

**Diagramación y finalización**

Ana Sofía Patiño Peláez

Alvaro Leonel Guerrero Castiblanco

**Diseño de carátula**

Alvaro Leonel Guerrero Castiblanco

Publicado por Ediciones EAN, 2018.

Todos los derechos reservados.

ISBN: 9789587565836 (Electrónico 2018)

©Universidad EAN, El Nogal: Cl. 79 No. 11 - 45. Bogotá D.C., Colombia, Suramérica, 2018  
Prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin autorización de la Universidad EAN®

©UNIVERSIDAD EAN: SNIES 2812 | Personería Jurídica Res. n°. 2898 del Minjusticia -  
16/05/69| Viglada Mineducación. CONACREDITACIÓN INSTITUCIONAL DE ALTA CALIDAD,  
Res. N° 29499 del Mineducación 29/12/17, vigencia 28/12/21

Producido en Colombia.

# Contaminación y remediación de suelos en Colombia

**Aplicación a la minería de oro**

---

**José Alejandro Martínez Sepúlveda:** Ingeniero químico por la Universidad Nacional de Colombia, magíster en Ingeniería Ambiental con énfasis en salud por la misma universidad y estudiante de doctorado en Administración Estratégica de Negocios por la Pontificia Universidad Católica del Perú.

**Miguel Reinaldo Casallas Ojeda:** Ingeniero ambiental por la Fundación Universidad Central. Joven investigador de la Universidad EAN 2014-2015





## Tabla de contenido

Introducción	7
--------------	---

### **1 La extracción de oro en Colombia 11**

1.1 Formas de extracción de oro	12
1.1.1 Amalgamación	12
1.1.2 Cianuración	13
1.2 Panorama global de la extracción de oro en Colombia	15
1.3 Impactos generados a partir de la extracción de oro	21
1.3.1 Impactos ambientales generales	21

### **2 Mecanismos convencionales de remediación de suelos contaminados 27**

2.1 Introducción	27
2.2 Tratamientos biológicos	31
2.2.1 Generalidades	31
2.2.2 Factores relevantes para la biorremediación	34
2.2.3 Pasos en un proceso de biorremediación	37
2.2.4 Landfarming	38
2.2.5 Compostaje	39
2.2.6 Fitorremediación	41
2.2.7 Fitorremediación	48
2.2.8 Humedales artificiales o construidos	49
2.2.9 Reactores aerobios	53
2.2.10 Reactores anaerobios	54
2.3 Tratamientos fisicoquímicos	57
2.3.1 Absorción por vapor del suelo	57
2.3.2 Oxidación química	58
2.3.3 Electrocínética	59
2.4 Tratamientos térmicos	61
2.4.1 Generalidades	61
2.4.2 Incineración	61
2.4.3 Desorción térmica	63
2.4.4 Pirólisis	65

<b>3</b>	<b>Mecanismos no convencionales de remediación de suelos contaminados</b>	<b>67</b>
	3.1 Sistemas no convencionales de remediación de suelos contaminados	67
	3.1.1 Oxidación avanzada	67
	3.1.2 Fenton	68
	3.1.3 Barreras biológicas para potenciar la electroremediación	68
	3.1.4 Bioelectrocínética	69
	3.1.5 Electrocinética-fitorremediación	70
	3.1.6 Nanotecnología	70
	3.1.7 Ultrasonidos	71
	3.1.8 Fenómenos moleculares: fitorremediación asistida con endófitas	72
	3.1.9 Ingeniería genética en asocio con fitorremediación	73
<b>4</b>	<b>El mercurio y sus formas químicas</b>	<b>75</b>
	4.1 Introducción	75
	4.2 Minería de oro y toxicidad del mercurio	76
	4.3 Físico-química del mercurio	77
	4.4 Remediación de sitios comprometidos con mercurio	80
	4.5 Mecanismos para fase sólida	81
<b>5</b>	<b>Alternativas de remediación para contaminación asociada a la minería aurífera en Colombia</b>	<b>85</b>
	Introducción	85
	5.1 Criterios para la selección de técnicas	86
	5.2 Alternativas de remediación y metodología de evaluación de criterios	89
	5.3 Evaluación de criterios para las alternativas de remediación	93
	<b>Conclusiones</b>	<b>97</b>
	<b>Referencias</b>	<b>101</b>

# Introducción

Las actividades extractivas, principalmente las vinculadas al petróleo y la minería, tienen una participación importante en el producto interno bruto (PIB) del país (López, Montes, Garavito y Collazos, 2012), teniendo en cuenta que el sector minero-energético ha sido impulsado como fuente de desarrollo económico por el presidente de Colombia Juan Manuel Santos. En el país, se han generado algunas problemáticas de índole ambiental y social ligadas a la extracción de sus recursos. Por ello, en los últimos años, se ha reglamentado una serie de decretos y leyes, cuyo objeto es hacer que las extracciones que se lleven a cabo se hagan teniendo en cuenta aspectos ambientales.

Los impactos negativos en el ambiente generados por la extracción, el procesamiento y el transporte de petróleo y oro en Colombia, en muchos casos, son enormes. Los departamentos identificados como mayores cifras en cuanto a extracción de oro son Antioquia, Bolívar, Caldas y Chocó; y en lo relacionado con la extracción de petróleo, los departamentos de mayor producción son Meta, Casanare y Arauca (Ministerio de Minas y Energía, 2009, 2010). Dentro de los impactos que se generan producto de la extracción de minerales preciosos e hidrocarburos en el país, se encuentran la deforestación, la contaminación de fuentes hídricas

y el aumento en el material particulado de la zona, además de la pérdida de hábitat. Según el Estudio Nacional del Agua 2014 realizado por el IDEAM (2015), solo durante 2012 se vertieron 205 toneladas de mercurio en 179 municipios ubicados en 15 departamentos. Estos procesos mencionados, desarrollados de una forma ilegal o no adecuada, generaron una alta posibilidad para los territorios de la presencia de pasivos ambientales a lo largo y ancho del territorio nacional.

En la línea de investigación en residuos de la Universidad EAN, dentro de un proceso de investigación de largo plazo sobre contaminación de suelos y remediación, se desarrolló durante 2015 una investigación exploratoria para empezar a recabar información sobre la problemática de los suelos contaminados por la minería, en particular, sobre los efectos del mercurio metálico en los suelos. Así, este estudio busca recoger elementos sobre la minería del oro por amalgamación y los métodos de remediación de suelos que pueden ser aplicables en el contexto colombiano desde la teoría, sirviendo como ilustración general de la problemática del tema en Colombia como una base teórica para el desarrollo experimental que debe continuar en los próximos años.

En esta investigación, se muestra, en primer lugar, un panorama de la situación de la extracción del oro y la contaminación con mercurio que se puede estar presentando en los componentes agua y suelo. En segundo lugar, se da a conocer el contexto de las opciones de remediación de suelos que existen para manejar diversos tipos de contaminación. En tercer lugar, se presenta una serie de opciones emergentes de remediación que son denominadas opciones de tratamiento no convencional. En cuarto lugar, se presentan algunas generalidades del mercurio como elemento y su comportamiento en la naturaleza. En quinto lugar se realiza un análisis de las posibilidades de implementación de sistemas de remediación para la contaminación asociada a metales pesados utilizados en la minería



aurífera. Por último se presentan una serie de conclusiones sobre los pasos a seguir para disminuir el impacto ambiental y los riesgos asociados a la presencia de dichos contaminantes en la matriz suelo.



## 1

# La extracción de oro en Colombia

Colombia es un país que ha tenido conocimientos sobre orfebrería desde hace cientos de años. Esto inició aproximadamente desde el siglo V a. C., época en la cual los caciques adornaban su cuerpo con objetos hechos de oro, con el fin de dar señal de prestigio y poder; dentro de los elementos usados, se encuentran narigueras y orejeras. El oro tenía connotaciones de índole religiosa, pues comunidades, como los muiscas, elaboraban representaciones de la vida cotidiana, como animales, entre otras, constituidas de oro denominadas “tunjos” que eran ubicadas en templos sagrados (Pineda, 2005).

El mercurio es un elemento que puede encontrarse en el ambiente a causa de fuentes naturales, entre ellas, las erupciones volcánicas, la erosión de rocas, el suelo y los incendios forestales, por todo esto, se puede hallar en las matrices agua, aire y suelo. Además de estas fuentes, existe una serie de liberaciones que son de origen antropogénico, como las generadas a partir de la fabricación de distintos productos, como las amalgamas dentales y las cremas aclarantes para la piel (Organización Mundial de la Salud, 2011; Mercuriados, 2011).

Otra causa de la presencia de este metal en el ambiente es el desarrollo de actividades extractivas, como la obtención de oro. Para realizar la extracción, se emplea el único metal líquido a temperatura ambiente que se ha usado durante un poco más de veinte siglos, que es el mercurio, elemento puesto en auge gracias a la implementación que hizo Bartolomé Medina del método “beneficio del patio” para la mezcla de minerales en frío (Español, 2012).

En Colombia, existen tres tipos de minería para la obtención de oro: la artesanal que desarrollan grupos étnicos y personas de bajos recursos, la mediana y la que se realiza a gran escala por empresas multinacionales. Sin embargo, desde 2001, se viene implementando una serie de normativas cuyo objeto es que los pequeños mineros se legalicen para evitar los altos costos ambientales y así parar o reducir la contaminación por mercurio, aunque la minería a gran escala también produce una alta contaminación (PBI Colombia, 2011).

## 1.1 Formas de extracción de oro

### 1.1.1 Amalgamación

La mayor parte de la contaminación por mercurio en Colombia es ocasionada por procesos extractivos para la obtención de oro. En el país, el mercurio se mezcla con la piedra o roca que posee el metal, con lo cual se busca que atrape el mineral en una pulpa acosa hasta formar una masa que se denomina amalgama. Luego, será sometida a una presión que en casos artesanales se realiza con la mano y en casos de minería a gran escala se lleva a cabo con prensas (UPME, 2007), lo cual ocasiona el derrame del metal pesado junto con los residuos del suelo al ambiente (Figura 1.1).