



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Tratamiento Térmico Como Medio De Eliminación Para Suelos  
Contaminados Con Mercurio: Revisión Sistemática**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
Ingeniero Ambiental**

**AUTORES:**

Cano Mamani, Kevin Ronald (ORCID: 0000-0002-8842-1373)

Luna Mendoza, Brando Enrique (ORCID: 0000-0001-8640-0512)

**ASESOR:**

Mgr. Honores Balcázar, César Francisco (ORCID: 0000-0003-3202-1327)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN**

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LIMA - PERÚ

2021

## **DEDICATORIA**

A Dios por acompañarme día a día en mi vida.

A mi esposa Yahaira y a mis hijos Gabriel y Gia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hacen de mí una mejor persona, me acompañan en todos mis sueños y metas.

A mis padres Freddy y Teresa quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más.

A mis hermanos Freddy Alexander y Carmen Cecilia por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias.

**Kevin Ronald Cano Mamani**

A mi familia, en especial a mi madre por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo que será de mi vida.

A mi pareja Alejandra quien puso toda su confianza y apoyo en que lograría un objetivo más en mi vida y a todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano.

**Brando Enrique Luna Mendoza**

## **AGRADECIMIENTO**

En el presente trabajo queremos agradecer a Dios por ser nuestro guía y acompañarnos en el transcurso de nuestras vidas, brindándonos paciencia y sabiduría para culminar con éxito nuestras metas propuestas.

Agradecemos a la Universidad Cesar Vallejo por aceptarnos y apoyarnos para conseguir nuestro título profesional, a nuestro asesor de tesis por su experiencia, conocimiento, motivación y sus orientaciones en la investigación

Agradecemos a los todos docentes de nuestra vida universitario que, con su sabiduría, conocimiento y apoyo, motivaron a desarrollarnos como personas y profesionales.

**Los autores**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CARÁTULA.....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	vii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
III. METODOLOGÍA.....	15
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	15
3.2. Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística.....	15
3.3. Escenario de estudio.....	17
3.4. Participantes.....	17
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	17
3.6. Procedimiento.....	18
3.7. Rigor científico.....	19
3.8. Método de análisis de información.....	19
3.9. Aspectos éticos.....	20
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
V. CONCLUSIÓN.....	30
VI. RECOMENDACIONES.....	31
REFERENCIAS.....	32
ANEXO.....	

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Antecedentes de tratamientos térmicos.....	10
Tabla 2: Matriz de categorización apriorística .....	16
Tabla 3: Proceso de inclusión y exclusión de literaturas .....	18
Tabla 4: Documentos añadidos al estudio.....	18
Tabla 5: Rango de T° efectiva para eliminar el Hg .....	21
Tabla 6: Tratamientos térmicos más estudiados .....	24
Tabla 7: Capacidad de eliminación empleando el tratamiento térmico .....	27

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Transporte y acumulación del Hg en el suelo hasta el ser humano .....	5
Figura 2: Tipos de tratamientos In situ y Ex situ en un suelo contaminado .....	7
Figura 3: Ilustración esquemática de las estrategias de remediación de mercurio - Remediación in situ con bio/fitorremediación y tratamiento térmico .....	8
Figura 4: Ventajas y desventajas del tratamiento térmico in situ .....	9

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

Hg: Mercurio

MeHg: Metilmercurio

USEPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos

PDI: Ingesta diaria probable

IDTP: Ingesta diaria tolerable provisional

## RESUMEN

La presente investigación sistemática tiene como objetivo realizar una revisión de los tratamientos térmicos en la literatura para la eliminación de Hg en el suelo e identificar el rango de temperatura más efectiva para la eliminación del Hg del suelo, determinar los tratamientos térmicos más estudiados para la eliminación de Hg en el suelo y por último analizar la capacidad de eliminación empleando el tratamiento térmico en suelos contaminados con Hg.

Considerando 71 referencias bibliográficas y 20 literaturas añadidas al estudio como aporte de la revisión sistemática; se obtuvo para el primer objetivo específicos: que el rango de temperatura más efectiva para la eliminación del Hg del suelo se encuentra entre los 200 y 600°C; siendo entre ellos el intervalo de T° en el cual se evidencia un mayor porcentaje de eliminación del Hg del suelo; de igual manera, los tratamientos térmicos más estudiados para la eliminación de Hg en el suelo nos indicaron que 17 investigadores emplearon los métodos de desorción térmica por descontaminación ex situ, donde 14 veces emplearon la desorción térmica y 3 veces el método de pirólisis; demostrando que la capacidad de eliminación los tratamientos térmicos varían entre un 90 al 100%; siendo en su mayoría los tratamientos de desorción térmica. Finalmente, buscado recomendar profundizar en los tratamientos térmicos como la inyección de agua caliente, de aire caliente, vitrificación, calentamiento por resistencia eléctrica los cuales son métodos de tratamiento térmico prometedoras, pero son poco empleadas o profundizadas, así como el aplicar el tratamiento térmico en medio acuoso y emplear estudios con procesos combinados de tratamientos térmicos, y generar intervalos de eficiencia.

**Palabras clave:** Tratamiento térmico, Desorción térmica, contaminación del suelo con mercurio, ventajas, desventajas.

## ABSTRACT

The objective of this systematic investigation is to review the thermal treatments in the literature for the removal of Hg from soil and to identify the most effective temperature range for the removal of Hg from soil, to determine the most studied thermal treatments for the removal of Hg from soil, and finally to analyze the removal capacity using thermal treatment in soils contaminated with Hg.

Considering 71 bibliographic references and 20 literatures added to the study as a contribution of the systematic review, it was obtained for the first specific objective: that the most effective temperature range for the elimination of Hg from soil is between 200 and 600°C; being among them the T° interval in which a higher percentage of Hg elimination from soil is evidenced; Similarly, the most studied thermal treatments for the elimination of Hg in soil indicated that 17 researchers used thermal desorption methods for ex situ decontamination, where 14 times they used thermal desorption and 3 times the pyrolysis method; demonstrating that the elimination capacity of thermal treatments varies between 90 and 100%, most of them being thermal desorption treatments. Finally, we seek to recommend to deepen in thermal treatments such as hot water injection, hot air, vitrification, electrical resistance heating, which are promising thermal treatment methods, but are little used or deepened, as well as the application of thermal treatment in aqueous medium and the use of studies with combined processes of thermal treatments, and to generate efficiency intervals.

**Key words:** Heat treatment, thermal desorption, mercury soil contamination, advantages, disadvantages.

## I. INTRODUCCIÓN

El mercurio (Hg) es un elemento natural que se encuentra habitualmente en el medio ambiente, que, durante la era postindustrial, la combustión de combustibles fósiles combinada con el transporte atmosférico de largo alcance ha aumentado el Hg en suelos y sedimentos por un factor de 3 a 10 veces (Xu et al., 2015, p.2). El derivado de fuentes naturales y antropogénicas está ampliamente distribuido por todo el mundo y puede ser transportado rápidamente desde una fuente puntual y posteriormente entrar en el ciclo global del Hg, depositándose finalmente en ecosistemas acuáticos o terrestres (Zaika Yuri et al., 2021, p.2). En particular, el Hg es mucho más persistente en los suelos que en los lagos, los océanos y otros biomas (Hu Guangji et al., 2021, p.1).

Se estimó que la extracción y el procesamiento de minerales son responsables del 13% de las emisiones globales de Hg; a pesar de que las emisiones de Hg entre otros metales generados por la industria de metales no ferrosos disminuyeron en Europa durante los últimos 50 años debido a la instalación de sistemas eficientes de limpieza de gases de combustión, las crecientes actividades industriales en otros continentes (Asia, África) podrían afectar significativamente las emisiones globales de este y otros metales (Ettler V., 2016, p.1). También, las actividades industriales como la combustión de carbón han provocado un aumento de las concentraciones de Hg en diferentes medios ambientales, siendo destacado la contaminación en el recurso suelo (Wang et al., 2020, p.1).

En los seres humanos el mercurio es altamente tóxico, que llega a causar daños hepáticos y pulmonares mientras que, en los animales, aunque es raro, las mascotas se intoxican debido al consumo de alimentos con altos niveles de mercurio (RRamesh Gupta et al., 2018, p.1). Una vez transformado en sus formas organomercuricas, como el metilmercurio (MeHg), el Hg actúa como una potente neurotoxina que altera la función cerebral. Aparte de la alta toxicidad de esta forma de mercurio, ha suscitado especial preocupación por su capacidad para biomagnificar en la cadena alimentaria (He et al., 2015, p.1).



Debido a este metal pesado tóxico, a sus efectos en el ser humano, medio ambiente y suelo ha sido considerado como uno de los “diez principales productos químicos de más preocupación” (OMS, 2017, p.1). Y teniendo en cuenta la salud del medio ambiente, más de 130 países acordaron recientemente el Convenio de Minamata de las Naciones Unidas para reducir la emisión y el uso del Hg (PNUMA, 2013, p.1).

Pero también, debido a la alta toxicidad y a la amplia difusión de los iones de metales pesados como contaminantes ambientales, se necesita urgentemente el desarrollo de estrategias para la eliminación del Hg<sup>2+</sup> (Zhang et al., 2021, p.2). Entre estas técnicas aplicables, la solidificación/estabilización, el lavado del suelo, el tratamiento térmico y la vitrificación se consideraron viables para el tratamiento de suelos y residuos (Yuan et al., 2017, p.1). Siendo demostrado que el tratamiento térmico elimina eficazmente los contaminantes introduciéndolos a altas temperaturas y el suelo descontaminado generalmente regresa al sitio original (Meyer Daniel et al., 2016, p.2).

Por lo expuesto anteriormente se plantea; los siguientes problemas; siendo el problema genera: ¿Cuál es la ventaja de la aplicación del tratamiento térmico para la eliminación del Hg del suelo?, y como problemas específicos: ¿Cuál es el rango de temperatura más efectiva para la eliminación del Hg del suelo?, ¿Cuáles son los tratamientos térmicos más estudiados para la eliminación de Hg en el suelo?, y ¿Cuál es la capacidad de eliminación empleando el tratamiento térmico en suelos contaminados con Hg?.

De esta manera se elaboró el objetivo general y específicos: Determinar la ventaja de la aplicación del tratamiento térmico para la eliminación del Hg del suelo; y como objetivos específicos: Identificar el rango de temperatura más efectiva para la eliminación del Hg del suelo, Determinar cuáles son los tratamientos térmicos más estudiados para la eliminación de Hg en el suelo y Analizar la capacidad de eliminación empleando el tratamiento térmico en suelos contaminados con Hg.

La investigación realizada se justifica en base a la realidad problemática que se pretende esclarecer mediante la indagación y recolección de artículos de investigación de manera actualizada a nivel mundial, acerca del tratamiento térmico como medio de eliminación para los suelos contaminados con mercurio; para llenar

los vacíos críticos de conocimiento y ampliar la sustentabilidad de las tecnologías térmicas, sirviendo como un aporte teórico actualizado para futuros investigadores y contribución con la sociedad en general.

## II. MARCO TEÓRICO

El mercurio (Hg) es un contaminante ambiental peligroso y persistente que se libera tanto de fuentes naturales como antropogénicas y a diferencia de otros metales pesados, el mercurio puede permanecer en la atmósfera para retención y migración a larga distancia (Hsu-lim H. et al., 2018, p.1). Finalmente, alrededor del 93,70% del mercurio entra en el ecosistema terrestre y acuático a través de la deposición seca y húmeda deposición seca y húmeda (Xu Xiaohang et al., 2017, p.3).

El ion mercúrico produce toxicidad sistémica en concentraciones mucho más bajas mediante la inhibición de muchas enzimas (Thomas W. 2018, p.113). Y la intoxicación clínica por mercurio puede ser aguda o crónica y se debe a la inhalación de vapor de mercurio o a la ingestión de "sales" inorgánicas u orgánicas de mercurio (Duan Pengfei et al., 2020, p.2).

Al ser un elemento metálico pesado altamente tóxico es considerado universalmente tóxicos para la materia viva (WAndrade V., Aschner M. y Dos Santos A., 2017, p.3). Además, es la única sustancia química que tiene un impacto global además de los gases de efecto invernadero; por eso es clasificado como contaminante mundial incluido en la lista del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (Xu Jiamin et al., 2020, p.1).

De acuerdo con el inventario mundial de emisiones antropogénicas de mercurio, Asia tiene la mayor cuota mundial, alcanzando más del 50%, y China China representa por sí sola el 33%, lo que la convierte en la mayor fuente antropogénica de mercurio en Asia (Wu Qingru et al., 2016). Siendo el suelo un reservorio importante de Hg y un actor clave en su ciclo global (Huang et al., 2020, p.1).

Este metal se encuentra tercero después del arsénico y plomo, en la lista de posiciones de metales más tóxicas, de acuerdo con la Agencia del Gobierno de EE.UU. y en el Registro de Enfermedades, como elemento o sustancia más tóxica que sigue siendo vertido en nuestras vías fluviales y en el suelo, liberados a la atmósfera y consumidos por humanos y animales a través de nuestros alimentos y agua (Rice et al., 2014, p.1).

En las últimas décadas, la contaminación por mercurio causada por actividades humanas, como la combustión de carbón, la minería y la producción industrial, son actividades que generan problemas mundiales debido a la amenaza que generan en los recursos suelos, agua, aire, así como la seguridad de los ecosistemas locales y vida (Li et al., 2020, p.3). Existe en diferentes grados en todo el mundo, donde la emisión mundial de Hg a la atmósfera por causas humanas fue de unas 2.220 t en 2015 procedentes de 20 sectores clave y podrían producirse emisiones adicionales del orden de decenas a cientos de toneladas al año procedentes de fuentes antropogénicas menores (Liu et al., 2020, p.2).

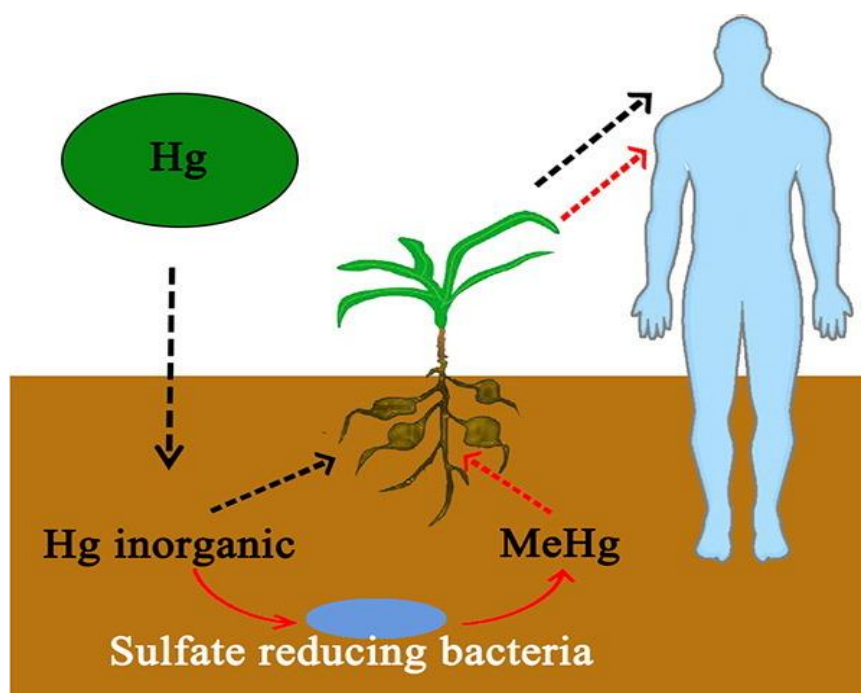


Figura 1: Transporte y acumulación del Hg en el suelo hasta el ser humano

Fuente: Jia et al., 2018, p.4

En la Figura 1, se observa el suelo como fuente importante de almacenamiento del Hg en las verduras; y su consumo podría resultar en una ingesta diaria probable (PDI) de T-Hg más alta que la ingesta diaria tolerable provisional (IDTP) tanto para adultos como para niños.

Los iones metálicos pueden ser eliminados de los suelos mediante lixiviación, absorción por las plantas y volatilización, mientras que son retenidos en los suelos mediante reacciones de sorción, precipitación y complejación (Bolan et al., 2014,

p.2). Pero para ello, se han utilizado varias tecnologías, como el lavado de suelos, la solidificación/estabilización, la fitorremediación y la remediación electrocinética, para eliminar o inmovilizar los metales en los suelos (Wang et al., 2018, p.1).

Asimismo, existen varios tratamientos disponibles para la descontaminación del suelo con metales pesados, incluidos tratamientos físicos, químicos, térmicos y biológicos, sin embargo, cuando los contaminantes son persistentes o tóxicos, a menudo es necesario utilizar un conjunto integrado de técnicas para mejorar los efectos de descontaminación (Vidonish Julio E. et al., 2016, p.2). Donde, los tratamientos integrados típicamente incluyen lavado de suelos, tratamiento térmico, procesos de estabilización o fitorremediación (Acosta et al., 2019, p.2).

De todas las tecnologías de tratamiento disponibles para la recuperación de suelos el tratamiento térmico es una de las alternativas más prometedoras y económicas para la recuperación de suelos exsitu (Wei Yunmei et al., 2020, p.2). En función de la temperatura de calentamiento y/o del entorno atmosférico adoptado, la remediación térmica puede dividirse en desorción térmica, pirólisis e incineración (O'Brien Peter et al., 2018, p.1).

La desorción térmica implica principalmente un mecanismo de evaporación física mediante el calentamiento hasta el punto de ebullición de los contaminantes del suelo, que suele adoptar una temperatura de tratamiento de 250 °C a 550 °C con niveles variables de O<sub>2</sub> (Zhao Zhong H. et al., 2017, p.1).

Además, el tratamiento térmico se ha utilizado a menudo para remediar los suelos contaminados con mercurio, convirtiendo los compuestos mercuriales sólidos en volátiles y compuestos mercuriales sólidos en mercurio volátil (Li et al., 2019, p.1). Siendo esta técnica utilizada en Europa, oriente y Latinoamérica (Lee Eun S. et al., 2020, p.4).

También se puede decir que es una tecnología prometedora para la remediación de suelos contaminados con mercurio, pero a menudo requiere un alto aporte de energía a temperaturas de calentamiento superiores a 600 °C (Fujun Ma et al., 2016, p.1). La quema al aire libre es el método principal de tratamiento térmico de desechos, pero se considera un proceso ambientalmente invasivo, donde ningún

dispositivo de control de la contaminación se enciende al aire libre, lo que permite que los contaminantes escapen al medio ambiente (Gunarathne et al., 2020, p.2).

El tratamiento térmico implica una secuencia de recocido en solución seguido de uno o más tratamientos de envejecimiento por precipitación y el recocido en solución se realiza para permitir que los carburos y los componentes precipitados pasen a una solución sólida (Weber J. et al., 2016, p.2).

Este método se practica en la mayoría de los países ya que proporciona una solución más económica para el tratamiento de residuos sólidos (Robbins Cristian et al., 2020, p.1). Dividiéndose el tratamiento térmico en remediación *In situ* y tratamiento *Ex situ* en la cual el tratamiento ex situ se trata de la excavación mientras que la in situ, la bioremediación, fitorremediación y el tratamiento térmico (Dow Noel et al., 2017. P.1).

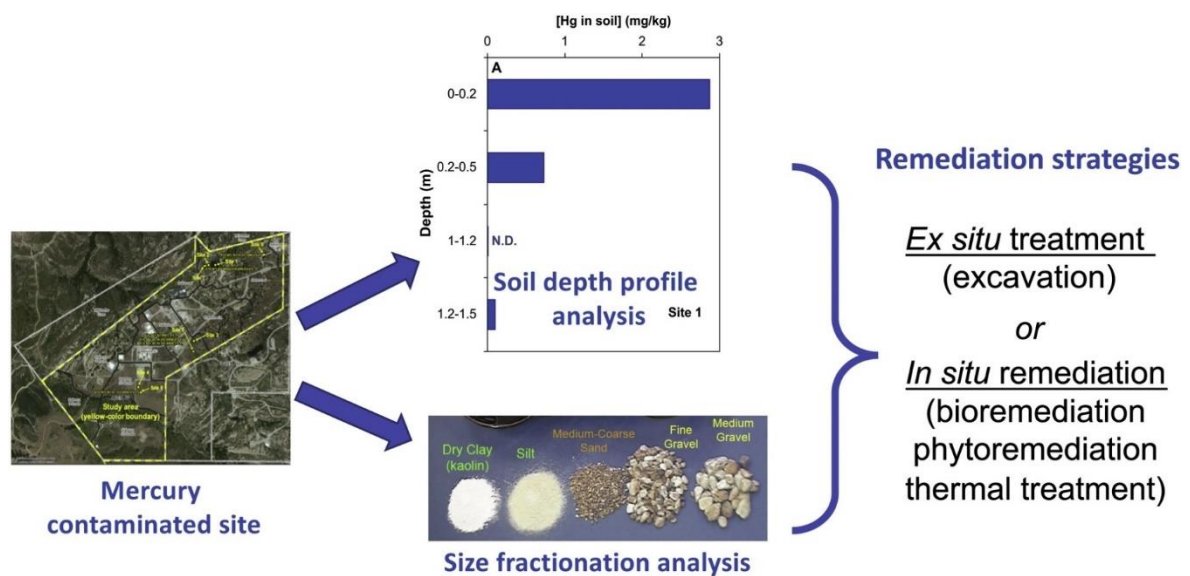


Figura 2: Tipos de tratamientos In situ y Ex situ en un suelo contaminado

Fuente: Matsumoto M. y Liu H., 2020, p.1

En suelos profundos por debajo de 1 m, el mercurio existe predominantemente como forma elemental que está estrechamente unido a las partículas del suelo, si bien esta fracción de mercurio no representa un riesgo inmediato para la salud, se puede evaluar el tratamiento térmico in situ para eliminar esta fracción de mercurio, como se muestra en la Figura 2.

Esto quiere decir, que los métodos de tratamiento térmico in situ mueven o “movilizan” sustancias químicas nocivas en el suelo y el agua subterránea utilizando calor, donde los productos químicos se mueven a través del suelo y el agua subterránea hacia los pozos donde se recolectan y conducen a la superficie del suelo para ser tratados utilizando otros métodos de limpieza (Ding et al., 2019, p.3).

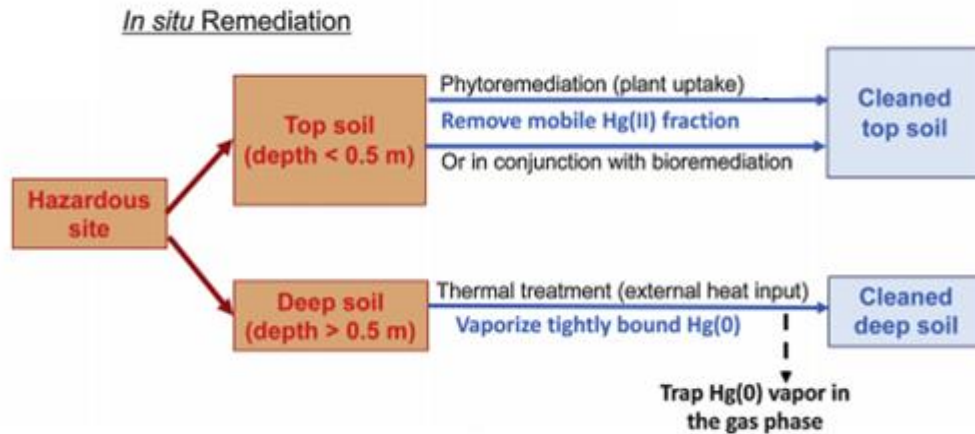


Figura 3: Ilustración esquemática de las estrategias de remediación de mercurio - Remediación in situ con bio/fitorremediación y tratamiento térmico

Fuente: Zhang et al., 2019, p.5

El tratamiento térmico debido a un aumento de temperatura debido a la actividad microbiana o mediante un suministro externo de energía es un tratamiento higiénico común y seguro, siempre que tanto la temperatura como el tiempo de tratamiento sean suficientes (Mohammad P. et al., 2018, p.4).

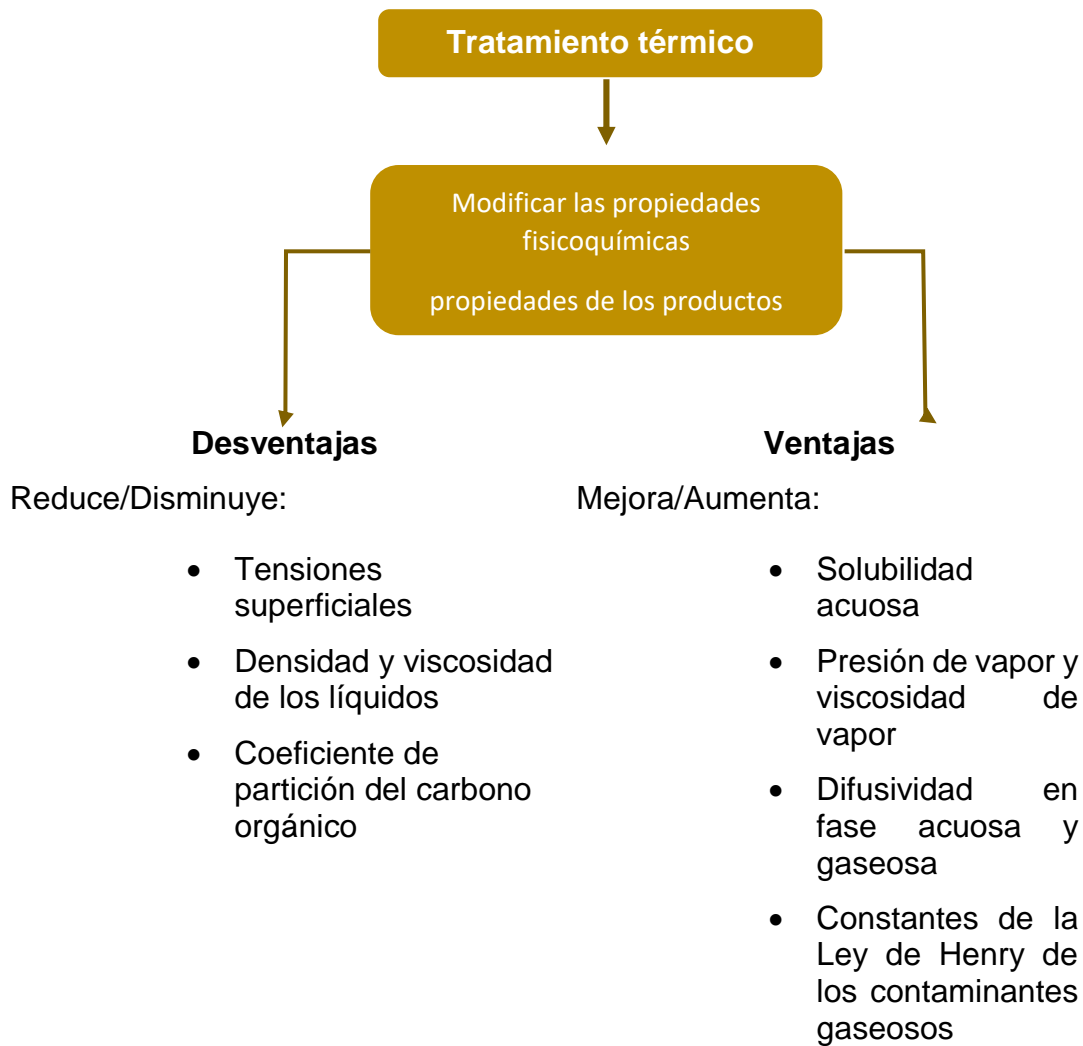


Figura 4: Ventajas y desventajas del tratamiento térmico in situ

Si bien es cierto que el tratamiento térmico es una tecnología prometedora para la remediación de suelos contaminados con mercurio, pero a menudo requiere un alto aporte de energía a temperaturas de calentamiento superiores a 600 ° C (Ma et al., 2015, p.1). Los mercurios  $Hg(0)$  y el  $Hg(I)$  no son volátiles cuando los suelos contaminados con mercurio se tratan a temperaturas inferiores a 200 °C, pero cuando las muestras son tratadas a temperaturas <200°C se forma altos contenidos de mercurio residual y a medida que aumenta la temperatura, otras especies de mercurio comienzan a volatilizarse del suelo (Schawartz B. y Elsworth D., 2021, p.1).



El tratamiento térmico puede remediar sitios contaminados de manera rápida y confiable, pero su naturaleza intensiva en energía y su potencial para dañar las propiedades del suelo lo hacen aparentemente no sostenible; de acuerdo a ello se evalúa el potencial del tratamiento térmico para convertirse en una tecnología de remediación sostenible (Liu Sijia et al., 2021, p.6). Para lo cual, en la Tabla N°1 se muestran 15 de los antecedentes más resaltantes acerca de las diversas investigaciones acerca de la aplicación del tratamiento térmico.

**Tabla 1: Antecedentes de tratamientos térmicos**

<b>Título</b>	<b>Contaminante</b>	<b>Máxima T°</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>Autor</b>
La cinética de la vaporización del mercurio en el suelo durante el tratamiento térmico a baja temperatura	Metales pesados	100 a 400 ° C	Se requieren temperaturas más altas para eliminar el Hg del suelo contaminado en comparación con los estados químicos puros	Park et al., 2020
La determinación directa de HgS por desorción térmica junto con espectrometría de absorción atómica.	Hg	480°C	Los porcentajes de Hg (II) desorbido de todas las muestras de suelo fueron menores al 0.6%, lo que sugirió que todos los suelos estudiados tenían una alta fuerza de unión para Hg (II).	Coufalík Pavel et al., 2016
Evaluación del ciclo de vida de tecnologías basadas en desorción térmica a baja temperatura para el tratamiento	Hg	240 °C 320 °C	El proceso de desorción térmica contribuyó del 80 al 90% del impacto total de los sistemas.	Hu Guangji et al., 2021

de recortes de perforación.				
Tratamiento térmico facilitado por ácido cítrico: Un método innovador para la remediación de suelos contaminados con mercurio	Mg	400 ° C	Se espera que este método reduzca la entrada de energía en un 35% en comparación con el método de tratamiento térmico tradicional.	Ma et al., 2015
Estudio sobre la cinética no isotérmica de la desorción térmica de mercurio a partir del catalizador de cloruro de mercurio gastado	Hg	1200°C	La difusión unidimensional parece gobernar el proceso de desorción de mercurio en el rango de conversión del 10% al 40%, y luego la cinética de la reacción se controla mediante la difusión bidimensional y tridimensional a una mayor conversión.	Liu Chao et al., 2017
Descontaminación de suelos contaminados en superficie con esporas de Bacillus anthracis mediante tratamiento térmico en seco.	Se	141 ° C	Los experimentos descritos en el estudio demuestran la viabilidad de utilizar técnicas térmicas secas para descontaminar suelos que han sido contaminados superficialmente con Se.	Wood et al., 2021

Remediación sostenible de suelos contaminados con diésel mediante tratamiento térmico a baja temperatura: Mejora de la eficiencia energética y de la reutilización del suelo.	Diesel	250 ° C	La tierra remediada con tratamiento térmico de baja temperatura (LTTT) fue favorable para la germinación y el crecimiento temprano del trigo. La comunidad microbiana cambió sustancialmente, pero se recuperó después de mezclarse con suelo no contaminado.	Ren et al., 2020
Tratamiento térmico de suelos co-contaminados con aceite lubricante y metales pesados en un incinerador de lecho fluidizado de dos etapas a baja temperatura.	Cd (II) Cr (III) Cu (II) Pb (II)	500 ° C 700 ° C	La cocción de polietileno en la remediación del suelo puede promover la calidad de los residuos.	Samaksaman et al., 2016
Tratamiento térmico facilitado por ácido cítrico: Un método innovador para la remediación de suelos contaminados con mercurio.	Hg	400 ° C 600 ° C	El contenido de Hg se redujo a <1,5 mg / kg cuando se trató a 400 ° C con ácido cítrico .	Ma et al., 2015
Fraccionamiento de mercurio en muestras de suelo y sedimentos mediante el	Hg	800°C 200°C 250°C	Este método podría aplicarse a muestras sólidas con una concentración	Saniewska D. y Beldowska M., 2017

método de termo desorción.			ambiental baja de Hg.	
Aplicación de la desorción térmica para la identificación de especies de mercurio en sólidos derivados de la utilización del carbón.	Hg	410°C	Incluso en el caso de contenidos bajos de mercurio, los porcentajes de recuperación se acercaron al 100%.	Rumayor M. et al., 2016
Descontaminación inducida por microondas de suelos contaminados con mercurio a baja temperatura asistida con carbón activado granular.	Hg	300 °C 350 ° C	Se logró una eficiencia de eliminación de Hg superior al 86,9% a aprox. 350 ° C en 40 min.	Cao Hai et al., 2018
Recuperación de mercurio a partir de desechos que contienen mercurio mediante un sistema de desorción térmica al vacío.	Hg	400°C	La tasa de eliminación de Hg después del tratamiento de desechos fue del 96,75% y la tasa de recuperación de Hg como Hg elemental fue del 75,23%.	Lee Woo R. et al., 2017
Estudio profundo de los efectos de los grupos funcionales de oxígeno del carbón activado para la adsorción de mercurio elemental mediante el método de	Hg	210°C	El aumento de la temperatura podría inhibir la adsorción de mercurio por el grupo carbonilo en el rango de temperatura de 130 a 210 ° C , y el grupo éster domina la adsorción de	Sun Ping et al., 2017

desorción programada por temperatura.			mercurio a 210 ° C.	
Comparación de la evaluación del ciclo de vida de la desorción térmica y la estabilización / solidificación de suelos contaminados con mercurio en tierras agrícolas.	Hg	700°C 400°C	Se estimó un método innovador de desorción a baja temperatura facilitado por ácido para reducir las emisiones de GEI a 264 kg de CO <sub>2</sub> -eq debido a la reducción en el uso de electricidad.	Hou Deyi et al., 2016

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Tipo y diseño de investigación**

El presente estudio es de enfoque cualitativo; ya que, la investigación cualitativa puede implicar conocer a las personas y luego informar sobre algún aspecto de sus vidas, a menudo desde una perspectiva crítica que difiere de la forma en que las personas se describen a sí mismas (Kayesa N. y Shung M., 2020, p.8).

De acuerdo a ello, el tipo de investigación es aplicada, ya que, de acuerdo con Edgar T. y Manz D., (2017, p.1) la investigación aplicada en cualquier disciplina se comprende mejor en contraste con la investigación básica o pura. Para algunos comentaristas, la investigación básica en geografía tiene como objetivo desarrollar nuevas teorías y métodos que ayuden a explicar los procesos a través de los cuales evoluciona la organización espacial de los entornos físicos o humanos. Por el contrario, la investigación aplicada utiliza la teoría o las técnicas geográficas existentes para comprender y resolver problemas empíricos específicos. Esto es empleado debido a que el énfasis en la investigación aplicada en el presente estudio sobre los tratamientos térmicos, se concentra en la mejora de la calidad del suelo debido a la contaminación que presenta por el metal mercurio.

El tipo de diseño es narrativo de tópico, puesto que, se sugiere que la narrativa no es sólo una forma de describir los acontecimientos, sino que forma parte de los acontecimientos; la narración fusiona los acontecimientos con la realidad, por muy "verdaderos" o "precisos" que sean y los relatos narrativos detallan experiencias y percepciones únicas relativas a diversos aspectos de la humanidad y la cultura (Noack A. y Schmidt T., (2016, p.1). Por ende, el presente trabajo de investigación sirve para entender el estudio de los tratamientos térmico como medio de eliminación de contaminantes del suelo.

#### **3.2. Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística**

Las categorías y sub categorías sin formuladas de acuerdo a los 3 problema y objetivos específicos; de los cuales cada punto especifica una metodología o un

grupo de metodologías que están estrechamente relacionadas entre sí; todo ello, se detallada en el cuadro de categorización en la Tabla N°2.

**Tabla 2: Matriz de categorización apriorística**

<b>Objetivos específicos</b>	<b>Problemas específicos</b>	<b>Categorías</b>	<b>Subcategorías</b>	<b>Unidad de análisis</b>
Identificar el rango de temperatura más efectiva para la eliminación del Hg del suelo,	¿Cuál es el rango de temperatura más efectiva para la eliminación del Hg del suelo?	Rango de temperatura óptima  (Liu et al., 2020, p.2)	Pirólisis baja Pirólisis media Pirólisis alta  (Liu et al., 2020, p.2)	(Wang et al., 2018, p.1), (Acosta et al., 2019, p.2), (Fraibler et al., 2009, p.1), (Ding et al., 2019, p.3), (Kucharski et al., 2005, p.2), (Ma et al., 2015, p.1), (Huang et al., 2020, p.1), (Mohammad P. et al., 2018, p.4), (Schawartz B. y Elsworth D., 2021, p.1), (Dow Noel et al., 2017. P.1)
Determinar cuáles son los tratamientos térmicos más estudiados para la eliminación de Hg en el suelo	¿Cuáles son los tratamientos térmicos más estudiados para la eliminación de Hg en el suelo?	Tipos de tratamientos térmicos  ( Glazunov G. et al., 2019, p.2)	Calentamiento por conducción Térmica  Desorción térmica  Calentamiento de descontaminación In situ  Desorción termina por descontaminación Ex situ  (Glazunov G. et al., 2019, p.3)	
Analizar la capacidad de eliminación empleando el tratamiento térmico en suelos contaminados con Hg.	¿Cuál es la capacidad de eliminación empleando el tratamiento térmico en suelos contaminados con Hg?	Capacidad de adsorción del Hg  (Gunarathne et al., 2020, p.2)	Método térmico  Porcentaje de remoción y/o eficiencia de eliminación  (Gunarathne et al., 2020, p.2)	

### **3.3. Escenario de estudio**

El escenario de estudio viene a ser lo que nosotros imaginamos que sería la realidad y lo llevamos a una situación en específica (Salinas, 2015, p. 8).

De acuerdo a ello, en el presente estudio de investigación no se va a contar con un escenario físico donde se realizaron los estudios, al ser una revisión sistemática se presenta como escenario de estudio a los artículos donde se llevó a cabo el desarrollo de las investigaciones ya sea a nivel de campo o de laboratorio donde los autores originales desarrollaron los tratamientos térmicos como medio de eliminación del mercurio en el suelo.

### **3.4. Participantes**

Los participantes vienen a ser la recolección colectiva de diversas literaturas empleadas a la eliminación de Hg en suelos a base de tratamientos térmicos; dichas literaturas son artículos de investigación provenientes de fuentes como Scielo, Sciencedirect, Scopus, entre otras páginas institucionales indizadas.

### **3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

La técnica empleada es el análisis documental mediante la ficha de análisis de contenido (Ver Anexo N°1), para la recolección de datos de los estudios seleccionados para incluir al estudio.

El análisis de documentos implica una lectura enfocada del documento, después de lo cual el investigador se involucra en la identificación de patrones en los datos y la formación de códigos y temas en los que se basa el análisis y el análisis de documentos implican los siguientes aspectos: la selección y categorización de documentos relevantes (b) la extracción y análisis de datos para extraer ideas y conclusiones sobre un concepto (c) responder a preguntas de investigación sobre quién, qué, dónde y cómo, en función de los objetivos de la investigación (Fereday J. y Muir E., 2006, p.1).



### 3.6. Procedimiento

**Tabla 3: Proceso de inclusión y exclusión de literaturas**

INCLUSIÓN DE DOCUMENTOS	EXCLUSIÓN DE DOCUMENTOS
31 Artículos del 2016-2021	Que sean mayores a los 10 años de antigüedad
Idiomas en inglés, español, portugués	Que sean tesis, libros, revistas
Artículos con potencial relevante para la revisión sistemática	Por duplicidad
Portales web indizadas	Por no tener relación con suelos contaminados con mercurio
	Que no cuenten con DOI ISBN ISNN

De acuerdo al proceso de inclusión y exclusión que pasaron los documentos para ser añadidos a la revisión sistemática se detalla en la tabla 4, los documentos.

**Tabla 4: Documentos añadidos al estudio**

TIPO DE DOCUMENTO	IDIOMA	PÁGINA WEB	PALABRA CLAVE	CANTIDAD
		SCIENCEDIRECT		16
			-Thermal treatment of contaminated soils	3
		SCIELO		
Artículo científico	Español Inglés		-Soils contaminated with mercury	
		SCOPUS		1
			-On-site thermal treatment	
			-Treatment to remove heavy metals	
TOTAL DE ARTÍCULOS				<b>20</b>

### 3.7. Rigor científico

El presente estudio cuenta con 4 criterios básicos de decretan la validez del documento, los cuales permiten que se cuente con el rigor científico correspondiente; el primero criterio es la **credibilidad**, ya que, con este criterio se atribuye la veracidad del presente escrito (Victoria y Mora 2011, pág. 503); siendo esto demostrado la correcta cita de cada artículo extraído, detallando datos del autor y de su estudio. Como segundo criterio se cuenta con la **transferibilidad**; este criterio hace que una información sea clara y transferible a otros estudios; hace que se permita comparar hallazgos y resultados con los de otros investigadores (Johansson 1994, pág. 179) y es esto empleado en la comparación de lo obtenido de diversos investigadores a nivel nacional e internacional con los resultados obtenidos en el presente estudio. El tercer criterio empleado es la **auditabilidad**; este criterio hace que un investigador tenga la habilidad de realizar el mismo procedimiento que genero el investigador original (Giraldo y Arias, 2011, p. 504), y es aplicado cuando se sigue los pasos que realizaron otros investigadores para realizar un tratamiento térmico. Como cuarto criterio se toma a la **fiabilidad**: este criterio está orientado a la concordancia a que tan probable es que se del mismo resultado desde diferentes enfoques (Pandey y Patnaik, 2014, p.5), y es aplicado en el mismo tema que se está abordando y en los diferentes resultados que obtienen los diversos autores de las literaturas seleccionadas para incluir al estudio.

### 3.8. Método de análisis de información

El presente estudio cualitativo siguió el método de triangulación para fortalecer la confiabilidad de los datos; ayudando a aumentar la confiabilidad de la investigación (Pandey y Patnaik, 2014, p.11). De igual manera se empleó la matriz apriorística, en la cual, se detallaron categorías y subcategorías para manejar de manera adecuada y ordenada la información que se expondrá en los resultados.

Se siguió el procedimiento de acuerdo a la matriz mencionada en la tabla N°2, donde se empleó las siguientes categorías: Rango de temperatura óptima, Tipos de tratamientos térmicos, Capacidad de adsorción del Hg desglosando cada una de ellas sus respectivas sub categorías: Rango de temperatura óptima (Pirólisis baja, Pirólisis media, Pirólisis alta), Tipos de tratamientos térmicos (Calentamiento

por conducción Térmica, Desorción térmica, Calentamiento de descontaminación In situ, Desorción termina por descontaminación Ex situ), Capacidad de adsorción del Hg (Método térmico, Porcentaje de remoción y/o eficiencia de eliminación).

### **3.9. Aspectos éticos**

Los aspectos éticos que se siguieron en el presente estudio de investigación fueron: Resolución del Consejo Universitario N° 0103-2018 de la UCV, resolución rectoral 0089-2019 de la UCV y Norma ISO 690; con los cuales se garantiza la validez y autenticidad de la investigación.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de haber realizado una revisión de 20 investigaciones bibliográficas acerca de los tratamientos térmicos en la literatura para la eliminación de Hg en el suelo se tuvo como primer resultado del rango de temperatura más efectiva para la eliminación del Hg del suelo, lo expuesto en la tabla 5.

Tabla 5: Rango de T° efectiva para eliminar el Hg

<b>Autor</b>	<b>Temperatura (T°<sub>Hg</sub>)</b>	<b>Tiempo</b>	<b>% de Remoción Hg</b>
Park et al., 2020	100 °C	204 días	90%
	400°C	2.77 h.	
Cao et al., 2018	350 °C	40min.	86,9%
Ma et al., 2015	400°C	1hora	Reducción de 134 mg / kg a <1,1 mg / kg 90%
Huang et al., 2021	No indica	1h.	10% a 70%
Park et al., 2015	150-250°C	No indica	99%
Lee et al., 2020	700°C	30min.	Reducción de 26,39 mg-Hg / kg a 3,87 mg-Hg / kg 99,5%
Sun Ping et al., 2017	210 °C	1 hora	98%
Sang et al., 2021	350 ° C	1 hora	93%
Hung et al., 2016	700 ° C	33 min	97,8%
Navarro et al., 2019	400–500 ° C	1 hora	41,3–87%
Wei Yunmei et al., 2020	>350°C	1 hora	99.9%

Chang et al., 2018	550-650°C	62min.	85%
Dziok et al., 2020	300 ° C	10 min.	99%
Chang T. y Yen J., 2016	700 °C	2 horas	90%
Saniewska Dominika et al., 2017	250°C	24 horas	64%
Xu et al., 2015	460–700 °C	1 hora y 30 min.	99%
Reis et al., 2015	100 a 285 °C 500-610 °C	No indica	95% 80%
Lee et al., 2017	230 °	2 horas	96,75%
Rumayor et al., 2017	50-600 °C	1 hora y 30 min.	98%
Liu Chao et al., 2017	1200 °C	2 horas	97%

Los rangos de temperatura que presentan mayor efectividad en la eliminación de Hg del suelo se encuentra en el promedio de 200 a 600°C; siendo esto corroborado por 14 de 20 investigadores quienes empleando el promedio indicado de temperatura en los tratamientos térmicos demostraron presentar porcentajes de remoción de un 90 al 100%.

Los investigadores que presentan porcentajes altos con un promedio de 200 a 600°C son: Park et al., 2020, Cao et al., 2018, Ma et al., 2015, Park et al., 2015, Sun Ping et al., 2017, Sang et al., 2021, Navarro et al., 2019, Wei Yunmei et al., 2020, Dziok et al., 2020, Saniewska Dominika et al., 2017, Reis et al., 2015, Lee et al., 2017, Rumayor et al., 2017, Liu Chao et al., 2017.

De manera análoga, Márquez et al., 2010 en la Tabla N°1, indica que el sistema de tratamientos térmicos es capaz de proveer una temperatura uniforme al sustrato, así como de operar por largos periodos de tiempos; indicando que en su

investigación el promedio de temperaturas adecuada es de 430°C a 600°C para la eliminación de Hg.

Por otro lado; la temperatura de remediación óptima debe evaluarse en función al tiempo y desorción térmica del Hg (Schuster E., 1991, p.1). Esto es corroborado por Park et al., 2020, quien señala que el tiempo en el tratamiento térmico es esencial para aumentar la remoción de Hg del suelo; donde empleando una temperatura de 100°C con un tiempo de 204 días obtiene el 90% de eliminación de Hg mientras que aumentando la temperatura a 400°C con un menor tiempo de 2.77horas también se obtiene 90% de eliminación.

De igual manera Wei Yunmei et al., 2020 señala que con tiempos bajos de 1 hora se puede obtener una eficiencia de eliminación de >99,9% con temperaturas superiores a 350 ° C; ya que con esa temperatura y tiempo los complejos se descomponen liberando cianuros libres altamente tóxicos, que posteriormente se oxidarán.

Asimismo, los siguientes investigadores emplearon tiempos térmicos bajos y temperaturas altas: Xu et al., 2015 con 460–700 °C en 1 hora y 30 min.; Chang T. y Yen J., 2016 con 700 °C en 2 horas; Chang et al., 2018 con 550-650°C en 62min.; Navarro et al., 2019 en 400–500 °C con 1 hora; Hung et al., 2016 en 700 ° C con 33 min; Sang et al., 2021 en 350 ° C con 1 hora; Ma et al., 2014 en 400 ° C con 1 hora; Lee et al., 2020 en 700°C con 30min.; Ma et al., 2015 en 400°C con 1hora.

Así mismo Wang et al., (2016, p.1), en su estudio presentó los siguientes metales pesados Ni 153 mg / kg, Cu 448 mg / kg, Zn 227 mg / kg, Cd 0,80 mg / kg, Sn 838 mg / kg, Sb 658 mg / kg y Pb 114 mg / kg), que se detectaron en suelos industriales. Donde, los experimentos de tratamiento térmico indicaron que se podrían obtener mejores (> 80%) tasas de fijación de Be, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Sn y Sb en estos suelos a una temperatura de incineración alta de 700 ° C y a un tiempo de incineración baja de 45 min., donde a estas condiciones, las concentraciones de Be, Cr, Co, Ni, Zn y Cd en los lixiviados del procedimiento de lixiviación característica de toxicidad (TCLP) obviamente disminuyeron a concentraciones que eran más bajas que las correspondientes concentraciones.

Por otro lado; para determinar cuáles son los tratamientos térmicos más estudiados para la eliminación de Hg en el suelo se estudió a 20 literaturas aplicando tratamientos térmicos para la eliminación de Hg del suelo; donde los resultados se muestran en la tabla 6.

**Tabla 6: Tratamientos térmicos más estudiados**

<b>Método</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Autores</b>
Desorción térmica por descontaminación In situ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presenta tiempos cortos a diferencia de otras tecnologías</li> <li>• No requiere de excavaciones o transportar el suelo al ser un tratamiento In situ</li> <li>• Se puede aplicar a suelos con niveles altos de humedad</li> <li>• Post tratamiento térmico el suelo queda disponible para biodegradación de los contaminantes residuales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento de costos por los vapores generados por las altas temperaturas; los cuales deben de ser atrapados y tratados.</li> </ul>	Inyección de vapor (3 veces)
Desorción térmica por descontaminación Ex situ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elimina contaminantes volviendo sus concentraciones a muy bajas cantidades.</li> <li>• Puede procesar variedades ampliar de contaminantes y suelos.</li> <li>• Conserva su capacidad para soportar la actividad biológica,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A veces se debe deshidratar el suelo para que la energía que se emplee para deshidratar el suelo sea menor.</li> <li>• Genera emisiones que deben ser tratadas.</li> </ul>	Desorción térmica (14 veces) Pirólisis (3veces)

	debido a las bajas temperaturas en las que se puede eliminar el contaminante.		
Tecnología empleada	Ventajas	Desventajas	Aplicación
Calentamiento por Conducción Térmica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presenta costos bajos.</li> <li>• Periodos cortos de horas o pocos días en tiempos de limpieza.</li> <li>• Los equipos a emplear no requieren de demasiada energía eléctrica ni ingeniería.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transferencia de calor hacia el suelo</li> </ul>	<i>In situ</i>
Desorción térmica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Idoneidad para ser aplicado en diferentes tipos de contaminantes.</li> <li>• Alta eficiencia.</li> <li>• Alta seguridad y capacidad para reciclar suelo y contaminantes.</li> <li>• Periodos cortos de horas o pocos días en tiempos de limpieza.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En la fase de técnicas de separación los residuos generados deber ser tratados generando permisos para el tratamiento.</li> <li>• Sistemas de recuperación; por los fluidos generados en el proceso de extracción.</li> </ul>	<i>Ex situ</i>



Inyección de vapor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipo fácil de obtener.</li> <li>• Fácil instalación.</li> <li>• Periodo corto de tratamiento.</li> <li>• Puede combinarse con otras tecnologías.</li> <li>• El vapor sobrecalentado barre la zona no saturada a lo largo del tiempo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No puede eliminar la concentración más del 90%.</li> <li>• No es del todo eficiente cuando se aplica a suelos permeables.</li> <li>• No puede tratar zonas con suelos saturados.</li> </ul>	<i>In situ</i>
Pirólisis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficiente en compuestos orgánicos volátiles, semi volátiles y pesticidas.</li> <li>• Especial para suelos con metales pesados</li> <li>• No requiere equipos costosos.</li> <li>• No emplea alto consumo de materiales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere de altas temperaturas</li> <li>• Dificultad de obtener selectivamente altos rendimientos de producto valioso.</li> </ul>	<i>Ex situ</i>

Los tratamientos térmicos como la desorción térmica (DT), Calentamiento por Conducción Térmica/Desorción Térmica In Situ, Inyección de Agua Caliente, Inyección de Aire Caliente, entre otros para remediar suelos contaminados reciben cada vez mayores atenciones; debido a las ventajas que presenta y a los excelentes resultados en sus porcentajes de remoción (Zhao et al., 2019, p.1). Esto es también apoyado por Wood et al., (2020, p.3), quien afirma que los experimentos descritos en su estudio demuestran la viabilidad de utilizar técnicas térmicas secas para descontaminar suelos que han sido contaminados superficialmente por metales pesados como Hg, Cd y Pb.

De acuerdo 6 respecto a la tabla 7 se tiene que los tratamientos térmicos más estudiados para la eliminación de Hg en el suelo son mediante técnicas ex situ; siendo empleado en una comparación de 20 artículos científicos; que 17 emplean los métodos de desorción térmica por descontaminación ex situ, donde 14 veces emplearon la desorción térmica y 3 veces el método de pirólisis; siendo ello corroborado por los investigadores: Cao et al., 2018, Park Chang et al., 2015, Lee Eun-Song et al., 2020, Sun Ping et al., 2017, Sang et al., 2021, Navarro et al., 2019, Wei Yunmei et al., 2020, Chang T. y Yen J., 2016, Saniewska Dominika et al., 2017, Xu et al., 2015, Reis et al., 2015, Lee et al., 2017, Rumayor et al., 2017, Liu Chao et al., 2017, Hung et al., 2016, Chang et al., 2018 y Dziok et al., 2020.

Por otro lado, 3 investigadores emplearon la desorción térmica por descontaminación in situ; empleando 3 veces la inyección de vapor para descontaminar el suelo con Hg; siendo ello corroborado por: Park et al., 2020, Ma et al., 2015 y Huang et al., 2021.

De acuerdo a ello se busca resolver la interrogante de determinar cuál es la capacidad de eliminación empleando el tratamiento térmico en suelos contaminados con Hg; obteniendo los resultados en la tabla 7.

**Tabla 7: Capacidad de eliminación empleando el tratamiento térmico**

<b>Autor</b>	<b>Tratamiento térmico</b>	<b>% de Remoción Hg</b>
Park et al., 2020	Vaporización	90%
Cao et al., 2018	Calentamiento por desorción térmica	86,9%
Ma et al., 2015	Vaporización / Tratamiento térmico con un horno rotatorio a escala de laboratorio con un sistema de tratamiento de vapores de mercurio	Reducción de 134 mg / kg a <1,1 mg / kg 90%
Huang et al., 2021	Vaporización / Descontaminación térmica con reactor de lecho fijo	70%

Park Chang et al., 2015	Desorción térmica in situ	99%
Lee Eun-Song et al., 2020	Desorción térmica de residuos con/sin cloruros metálicos en horno eléctrico de mufla	Reducción de 26,39 mg-Hg / kg a 3,87 mg-Hg / kg 99,5%
Sun Ping et al., 2017	Desorción térmica	98%
Sang et al., 2021	Desorción térmica	93%
Hung et al., 2016	Pirólisis - Sistema térmico continuo a escala piloto	97,8%
Navarro et al., 2019	Desorción térmica	87%
Wei Yunmei et al., 2020	Desorción térmica	99.9%
Chang et al., 2018	Pirólisis	85%
Dziok et al., 2020	Pirólisis mediante torrefacción	99%
Chang T. y Yen J., 2016	Desorción térmica	90%
Saniewska Dominika et al., 2017	Termo desorción o desorción térmica	64%
Xu et al., 2015	Desorción térmica	99%
Reis et al., 2015	Termo desorción o desorción térmica	95%
Lee et al., 2017	Desorción térmica al vacío	96,75%
Rumayor et al., 2017	Desorción térmica	98%
Liu Chao et al., 2017	Desorción térmica	97%

De acuerdo a lo obtenido en la tabla 7; los resultados muestran que la capacidad de eliminación del Hg empleando diversos métodos térmicos se encuentra en intervalos de 90 al 100%; demostrando su eficacia para la eliminación y remoción de este metal del suelo.

El tratamiento térmico más empleado es la desorción térmica, presentando porcentajes de eliminación del Hg de: 99% (Park et al., 2015), 98% (Sun Ping et al.,

2017), 93% (Sang et al., 2021), 87% (Navarro et al., 2019), 90%, (Wei Yunmei et al., 2020) 99.9% (Chang T. y Yen J., 2016), 100%, 97% y 95% (Reis et al., 2012), 99% (Xu et al., 2015), 95% (Reis et al., 2015), 96,75% (Lee et al., 2017), 98% (Rumayor et al., 2017), 97% (Liu Chao et al., 2017).

La desorción térmica es una tecnología de separación física basada en calentar el suelo contaminado para volatilizar el agua y los contaminantes orgánicos (Fernández et al., 2014, p.344). Es una tecnología prometedora y una de las más empleadas para la remediación de suelos contaminados con mercurio, pero, a menudo requiere de energía a temperaturas de calentamiento superiores a 600 °C (Ma et al., 2015, p.1).

Con respecto a la capacidad de eliminación empleando el tratamiento térmico en suelos contaminados con Hg; como se muestra en la tabla 5; el promedio varía entre un 90 al 100%.

Siendo esto corroborado por: (Park et al., 2020), (Cao et al., 2018), (Park et al., 2015), (Lee et al., 2020), (Sun Ping et al., 2017), (Sang et al., 2021), (Hung et al., 2016), (Navarro et al., 2019), (Chang et al., 2018), (Dziok et al., 2020), (Chang T. y Yen J., 2016), (Xu et al., 2015), (Reis et al., 2015), (Lee et al., 2017), (Rumayor et al., 2017), (Liu Chao et al., 2017). Siendo 17 de 20 investigadores quienes obtuvieron porcentajes altos de remoción de mercurio del: 90%, 86,9%, 90%, 99%, 99,5%, 98%, 93%, 97,8%, 87%, 85%, 99%, 90%, (100%, 97% y 95%), 99%, 95%, 96,75%, 98%, 99,78%; respectivamente.

## V. CONCLUSIÓN

De acuerdo a la realidad problemática planteada para realizar una revisión sistemática de los tratamientos térmicos en la literatura para la eliminación de Hg en el suelo se tuvo que:

- ✓ El rango de temperatura más efectiva para la eliminación del Hg del suelo se encuentra entre los 200 y 600°C; esto es debido a que la mayoría de los tratamientos térmicos empleados son los métodos de desorción térmica. En este método el suelo descontaminado generalmente regresa al sitio original según la temperatura de funcionamiento; siendo los intervalos de desorción térmica a altas temperaturas entre los 320 a 560°C y desorción térmica a baja temperatura entre los 90 a 320 °C.
- ✓ Los tratamientos térmicos más estudiados para la eliminación de Hg en el suelo nos indicaron que 17 investigadores emplearon los métodos de desorción térmica por descontaminación ex situ, donde 14 veces emplearon la desorción térmica y 3 veces el método de pirólisis.
- ✓ Se demostró que todos los métodos de tratamientos térmicos son efectivos y eficientes pero los más empleados y con altos porcentajes de eliminación son los tratamientos de desorción térmica; intervalos de 90 al 100%; demostrando su eficacia para la eliminación y remoción del metal Hg del suelo.

## **VI. RECOMENDACIONES**

Con la finalidad de complementar los aportes realizados en la revisión sistemática del tratamiento térmico como medio de eliminación para suelos contaminados con mercurio; se adiciona las siguientes recomendaciones a los futuros investigadores:

- ✓ Se recomienda profundizar en los tratamientos térmicos como la inyección de agua caliente, de aire caliente, vitrificación, calentamiento por resistencia eléctrica, entre otros; los cuales son métodos de tratamiento térmico prometedoras, pero son poco empleadas o profundizadas en sus resultados.
- ✓ Se recomienda profundizar en la aplicación de tratamientos térmicos en medio acuoso; ya que la mayoría de estudios están enfocados a tratamientos de contaminantes en el suelo.
- ✓ Se recomienda emplear estudios con procesos combinados de tratamientos térmicos, y generar intervalos de eficiencia.

## VII. REFERENCIAS

ABANADES, S., et al. Fate of heavy metals during municipal solid waste incineration. *Waste management & research*, 2002, vol. 20, no 1, p. 55-68. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/0734242X0202000107>

ACOSTA-SANTOYO, Gustavo, et al. Analysis of the biological recovery of soils contaminated with hydrocarbons using an electrokinetic treatment. *Journal of hazardous materials*, 2019, vol. 371, p. 625-633. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.015>

ANBIA, Mansoor; AMIRMAHMOODI, Shahram. Removal of Hg (II) and Mn (II) from aqueous solution using nanoporous carbon impregnated with surfactants. *Arabian Journal of Chemistry*, 2016, vol. 9, p. S319-S325. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2011.04.004>

ANDRADE, V. M.; ASCHNER, M.; DOS SANTOS, AP Marreilha. Neurotoxicity of metal mixtures. *Neurotoxicity of metals*, 2017, p. 227-265. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-60189-2\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-60189-2_12)

BERNHOF, Robin A. Toxicidad y tratamiento del mercurio: una revisión de la literatura. *Revista de salud pública y ambiental*, 2012, vol. 2012. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2012/460508>

BOLAN, Nanthi, et al. Remediation of heavy metal (loid) s contaminated soils—to mobilize or to immobilize?. *Journal of hazardous materials*, 2014, vol. 266, p. 141-166. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.018>

CAO, Hai-Lei, et al. Microwave-induced decontamination of mercury polluted soils at low temperature assisted with granular activated carbon. *Chemical Engineering Journal*, 2018, vol. 351, p. 1067-1075. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.168>

CARR, David. Narrative and the real world: An argument for continuity. *History and theory*, 1986, vol. 25, no 2, p. 117-131. Disponible en: <https://doi.org/10.2307/2505301>

CHANG, Moo-Been; HSU, Yen-Chen; CHANG, Shu-Hao. Removal of PCDD/Fs, PCP and mercury from sediments: Thermal oxidation versus pyrolysis. *Chemosphere*, 2018, vol. 207, p. 10-17. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.037>

CHANG, T. C.; YEN, J. H. On-site mercury-contaminated soils remediation by using thermal desorption technology. *Journal of hazardous materials*, 2016, vol. 128, no 2-3, p. 208-217. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.053>

CLARKSON, Thomas W.; MAGOS, Laszlo. The toxicology of mercury and its chemical compounds. *Critical reviews in toxicology*, 2006, vol. 36, no 8, p. 609-662. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10408440600845619>

CLIFFORD, Dennis A.; CHEN, Shen-Sin; REZNIK, Carmen. Volatilizing toxic metals from soil. *Waste Management*, 1993, vol. 13, no 5-7, p. 467-479. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0956-053X\(93\)90078-B](https://doi.org/10.1016/0956-053X(93)90078-B)

COCĂRȚĂ, D. M., et al. Risk-based approach for thermal treatment of soils contaminated with heavy metals. En *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2013. p. 01005. Disponible en: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20130101005>

COUFALÍK, Pavel; ZVĚŘINA, Ondřej; KOMÁREK, Josef. The direct determination of HgS by thermal desorption coupled with atomic absorption spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2016, vol. 118, p. 1-5. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2016.01.004>

DOW, Noel, et al. Demonstration of membrane distillation on textile waste water: assessment of long term performance, membrane cleaning and waste heat integration. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2017, vol. 3, no 3, p. 433-449. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C6EW00290K>

DUAN, Pengfei, et al. Biotransformation fate and sustainable mitigation of a potentially toxic element of mercury from environmental matrices. *Arabian Journal of Chemistry*, 2020, vol. 13, no 9, p. 6949-6965. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.06.041>

DZIOK, Tadeusz; KOŁODZIEJSKA, Ewa K.; KOŁODZIEJSKA, Elżbieta L. Mercury content in woody biomass and its removal in the torrefaction process. *Biomass and*



Bioenergy, 2020, vol. 143, p. 105832. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105832>

KUCHARSKI, Rafal, et al. A method of mercury removal from topsoil using low-thermal application. Environmental Monitoring and Assessment, 2005, vol. 104, no 1, p. 341-351. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10661-005-1620-x>

DING, Da, et al. A review on the sustainability of thermal treatment for contaminated soils. Environmental Pollution, 2019, vol. 253, p. 449-463. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.118>

ETTLER, Vojtěch. Soil contamination near non-ferrous metal smelters: a review. Applied geochemistry, 2016, vol. 64, p. 56-74. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.09.020>

FEREDAY, Jennifer; MUIR-COCHRANE, Eimear. Demonstrating rigor using thematic analysis: A hybrid approach of inductive and deductive coding and theme development. International journal of qualitative methods, 2006, vol. 5, no 1, p. 80-92. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/160940690600500107>

Fernández Rodríguez, M. D., García Gómez, M. C., Alonso Blazquez, N., & Tarazona, J. V. (2014). Soil Pollution Remediation. Encyclopedia of Toxicology, 344–355. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386454-3.00579-0>

FRAIßLER, Gerald, et al. Thermodynamic equilibrium calculations concerning the removal of heavy metals from sewage sludge ash by chlorination. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2009, vol. 48, no 1, p. 152-164. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2008.03.009>

FROHNE, T., et al. Biogeochemical factors affecting mercury methylation rate in two contaminated floodplain soils. Biogeosciences, 2012, vol. 9, no 1, p. 493-507. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/bg-9-493-2012>

Giraldo C y Arias M. El rigor científico en la investigación cualitativa. Colombia. Invest. Educ. Enferm. 2011, 29(3). p. 504. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/iee/v29n3/v29n3a20.pdf>

GONZÁLEZ-CORROCHANO, B.; ALONSO-AZCÁRATE, J.; RODAS, M. Effect of thermal treatment on the retention of chemical elements in the structure of lightweight aggregates manufactured from contaminated mine soil and fly ash. *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 35, p. 497-507. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.061>

GUNARATHNE, Viraj, et al. Phytoremediation for E-waste contaminated sites. En *Handbook of Electronic Waste Management*. Butterworth-Heinemann, 2020. p. 141-170. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817030-4.00005-X>

HE, Feng, et al. In situ remediation technologies for mercury-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, vol. 22, no 11, p. 8124-8147. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4316-y>

HU, Guangji, et al. Life cycle assessment of low-temperature thermal desorption-based technologies for drill cuttings treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 401, p. 123865. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123865>

HU, Guangji, et al. Low-temperature thermal desorption and secure landfill for oil-based drill cuttings management: Pollution control, human health risk, and probabilistic cost assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 410, p. 124570. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124570>

HUA, J. M.; WEI, K. M.; ZHENG, Q. Thermal desorption of mercury from gold-loaded granule activated carbon and its effect on gold elution. *Hydrometallurgy*, 2012, vol. 117, p. 86-92. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.02.009>

HUANG, Tao, et al. Self-cementation of the alkali-activated volcanic tuff coupling with thiol-functionalized expanded perlite that enhances the solidification and stabilization of the mercury-contaminated soil. *Chemical Engineering Journal*, 2021, p. 131059. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131059>

HUANG, Yu-Tuan; HSEU, Zeng-Yei; HSI, Hsing-Cheng. Influences of thermal decontamination on mercury removal, soil properties, and repartitioning of coexisting heavy metals. *Chemosphere*, 2011, vol. 84, no 9, p. 1244-1249. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.05.015>

HUANG, Jen-How; SHETAYA, Waleed H.; OSTERWALDER, Stefan. Determination of (Bio)-available mercury in soils: A review. *Environmental Pollution*, 2020, p. 114323. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114323>

HUNG, Pao-Chen, et al. Simultaneous removal of PCDD/Fs, pentachlorophenol and mercury from contaminated soil. *Chemosphere*, 2016, vol. 144, p. 50-58. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.08.058>

HSU-KIM, Heileen, et al. Challenges and opportunities for managing aquatic mercury pollution in altered landscapes. *Ambio*, 2018, vol. 47, no 2, p. 141-169. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13280-017-1006-7>

ISRAEL, Mark; HAY, Iain. *Research ethics for social scientists*. Sage, 2006. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B0-08-043076-7/00167-4>

JIA, Qin, et al. Mercury in soil, vegetable and human hair in a typical mining area in China: Implication for human exposure. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, vol. 68, p. 73-82. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.05.018>

JOHANSSON, E., 1994. Scientific Rigour in Qualitative Research — Examples From a Study of Women ' s Health in Family Practice. , no. July. DOI 10.1093/fampra/11.2.176, Disponible en: <https://academic.oup.com/fampra/articleabstract/11/2/176/461621?redirectedFrom=fulltext>

LEE, Woo Rim; EOM, Yujin; LEE, Tai Gyu. Mercury recovery from mercury-containing wastes using a vacuum thermal desorption system. *Waste Management*, 2017, vol. 60, p. 546-551. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.017>

LI, Qihua, et al. Total mercury and methylmercury in the soil and vegetation of a riparian zone along a mercury-impacted reservoir. *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 738, p. 139794. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139794>

LI, Jining, et al. Removal and immobilization of heavy metals in contaminated soils by chlorination and thermal treatment on an industrial-scale. *Chemical Engineering*

Journal, 2019, vol. 359, p. 385-392. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.158>

LIU, Chao, et al. Study on non-isothermal kinetics of the thermal desorption of mercury from spent mercuric chloride catalyst. Journal of hazardous materials, 2017, vol. 322, p. 325-333. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.09.063>

LIU, Sijia, et al. Status and environmental management of soil mercury pollution in China: A review. Journal of Environmental Management, 2021, vol. 277, p. 111442. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111442>

LIU, Zhongchuang, et al. A review on phytoremediation of mercury contaminated soils. Journal of Hazardous Materials, 2020, p. 123138. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123138>

LEE, Eun-Song, et al. Effect of substitution reaction with tin chloride in thermal treatment of mercury contaminated tailings. Environmental Pollution, 2020, vol. 264, p. 114761. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114761>

Ma, Fujun, et al. Citric acid facilitated thermal treatment: an innovative method for the remediation of mercury contaminated soil. Journal of hazardous materials, 2015, vol. 300, p. 546-552. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.07.055>

Ma, Fujun, et al. Mercury removal from contaminated soil by thermal treatment with FeCl<sub>3</sub> at reduced temperature. Chemosphere, 2014, vol. 117, p. 388-393. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.08.012>

MÁRQUEZ-HERRERA, A., et al. Calentador de sustratos compacto y de bajo costo para tratamiento térmico in situ de películas delgadas depositadas por rf-sputtering. Revista mexicana de física, 2010, vol. 56, no 1, p. 85-91.

MATSUMOTO, Mark; LIU, Haizhou. Mercury speciation and remediation strategies at a historically elemental mercury spilled site. Journal of hazardous materials, 2020, vol. 384, p. 121351. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121351>

MENDOZA, Juan Luis, et al. Caracterización y tratamiento térmico de suelos contaminados por mercurio. En VI Simposio del Agua en Andalucía. IGME. 2005. p. 1077-1088.

MEYER, Daniel M., et al. Policy development fosters collaborative practice: the example of the Minamata Convention on Mercury. Dental Clinics, 2016, vol. 60, no 4, p. 921-942. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cden.2016.05.009>

MOHAMMAD-PAJOOH, Ehsan, et al. On-site treatment of flowback and produced water from shale gas hydraulic fracturing: A review and economic evaluation. Chemosphere, 2018, vol. 212, p. 898-914. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.145>

NAVARRO, A., et al. Application of solar thermal desorption to remediation of mercury-contaminated soils. Solar Energy, 2019, vol. 83, no 8, p. 1405-1414. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.03.013>

O'BRIEN, Peter L., et al. Thermal remediation alters soil properties—a review. Journal of environmental management, 2018, vol. 206, p. 826-835. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.052>

OMS, 2017. Diez productos químicos de gran preocupación para la salud. Organización Mundial de la Salud.

ORTEGA-ORTIZ, Hortensia, et al. Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados. línea) Disponible en: [http://abenmen.com/a/Nutricion\\_Vegetal-4.pdf](http://abenmen.com/a/Nutricion_Vegetal-4.pdf).(06.04. 2014), 2010.

PACIONE, Michael (ed.). Applied geography: principles and practice: an introduction to useful research in physical, environmental and human geography. Psychology Press, 1999. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-008044910-4.00663-5>

PANDEY, Satyendra C.; PATNAIK, Srilata. Establishing reliability and validity in qualitative inquiry: A critical examination. Jharkhand journal of development and management studies, 2014, vol. 12, no 1, p. 5743-5753. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/266676584\\_ESTABLISHING\\_RELIABILITY\\_AND\\_VALIDITY\\_IN\\_QUALITATIVE\\_INQUIRY\\_A\\_CRITICAL\\_EXAMINATION](https://www.researchgate.net/publication/266676584_ESTABLISHING_RELIABILITY_AND_VALIDITY_IN_QUALITATIVE_INQUIRY_A_CRITICAL_EXAMINATION)

PARK, Chang Min; KATZ, Lynn E.; LILJESTRAND, Howard M. Mercury speciation during in situ thermal desorption in soil. *Journal of hazardous materials*, 2015, vol. 300, p. 624-632. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.07.076>

PARK, Min-oh; KIM, Moon-Hyun; HONG, Yongseok. The kinetics of mercury vaporization in soil during low-temperature thermal treatment. *Geoderma*, 2020, vol. 363, p. 114150. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114150>

Ramesh C.Gupta, Dejan Milatovic, Rajiv Lall, Ajay Srivastava. Mercury. 2018, Pages 455-462. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811410-0.00031-3>

REIS, A. T., et al. Development and validation of a simple thermo-desorption technique for mercury speciation in soils and sediments. *Talanta*, 2012, vol. 99, p. 363-368. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2012.05.065>

REIS, Ana Teresa, et al. Thermo-desorption: a valid tool for mercury speciation in soils and sediments?. *Geoderma*, 2015, vol. 237, p. 98-104. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.08.019>

REN, Jiaqiang; SONG, Xin; DING, Da. Sustainable remediation of diesel-contaminated soil by low temperature thermal treatment: Improved energy efficiency and soil reusability. *Chemosphere*, 2020, vol. 241, p. 124952. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124952>

RICE, Kevin M., et al. Environmental mercury and its toxic effects. *Journal of preventive medicine and public health*, 2014, vol. 47, no 2, p. 74. Disponible en: <https://doi.org/10.3961/jpmp.2014.47.2.74>

ROBBINS, Cristian A., et al. On-site treatment capacity of membrane distillation powered by waste heat or natural gas for unconventional oil and gas wastewater in the Denver-Julesburg Basin. *Environment International*, 2020, vol. 145, p. 106142. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106142>

RUMAYOR, M., et al. An assessment of the environmental fate of mercury species in highly polluted brownfields by means of thermal desorption. *Journal of hazardous materials*, 2017, vol. 325, p. 1-7. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.068>

RUMAYOR, M., et al. Application of thermal desorption for the identification of mercury species in solids derived from coal utilization. *Chemosphere*, 2015, vol. 119, p. 459-465. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.07.010>

SAMAKSAMAN, Ukrit, et al. Thermal treatment of soil co-contaminated with lube oil and heavy metals in a low-temperature two-stage fluidized bed incinerator. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 93, p. 131-138. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.024>

SANG, Yimin, et al. Sustainable remediation of lube oil-contaminated soil by low temperature indirect thermal desorption: Removal behaviors of contaminants, physicochemical properties change and microbial community recolonization in soils. *Environmental Pollution*, 2021, p. 117599. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117599>

SANIEWSKA, Dominika; BEŁDOWSKA, Magdalena. Mercury fractionation in soil and sediment samples using thermo-desorption method. *Talanta*, 2017, vol. 168, p. 152-161. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.03.026>

SCHUSTER, E. The behavior of mercury in the soil with special emphasis on complexation and adsorption processes-a review of the literature. *Water Air & Soil Pollution*, 1991, vol. 56, no 1, p. 667-680. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/BF00342308>

SCHWARTZ, Brandon; ELSWORTH, Derek. Inverted U-shaped permeability enhancement due to thermally induced desorption determined from strain-based analysis of experiments on shale at constant pore pressure. *Fuel*, 2021, vol. 302, p. 121178. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121178>

Sivaramanan, S., 2013. E-waste management, disposal and its impacts on the environment. *Univ. J. Environ. Res. Technol.* 3, 531-537.

TANGAHU, Bieby Voijant, et al. A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*, 2011, vol. 2011. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2011/939161>

UNEP, AMAP. Technical Background Report to the Global Mercury Assessment 2018. 2019.

Thomas W. Clarkson. Inorganic and Organometal Pesticides. Volume 2, 2001, Pages 1357-1428. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-012426260-7.50064-1>

VALENCIA, M. y MORA, G., 2011. El rigor científico en la investigación cualitativa. vol. 29, no. 3, pp. 500-514. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/260776311\\_Scientific\\_rigor\\_in\\_qualitative\\_research](https://www.researchgate.net/publication/260776311_Scientific_rigor_in_qualitative_research)

VIDONISH, Julia E., et al. Pyrolytic treatment and fertility enhancement of soils contaminated with heavy hydrocarbons. Environmental science & technology, 2016, vol. 50, no 5, p. 2498-2506. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02620>

WANG, Dingyong; SHI, Xiaojun; WEI, Shiqiang. Accumulation and transformation of atmospheric mercury in soil. Science of the Total Environment, 2003, vol. 304, no 1-3, p. 209-214. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00569-7](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00569-7)

WANG, Lei, et al. Low-carbon and low-alkalinity stabilization/solidification of high-Pb contaminated soil. Chemical Engineering Journal, 2018, vol. 351, p. 418-427. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.118>

WANG, Liuwei, et al. Remediation of mercury contaminated soil, water, and air: A review of emerging materials and innovative technologies. Environment international, 2020, vol. 134, p. 105281. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105281>

WEBER, J. H.; KHALFALLA, Y. E.; BENYOUNIS, K. Y. Nickel-based superalloys: alloying methods and thermomechanical processing. 2016.

WEI, Yunmei, et al. Thermal remediation of cyanide-contaminated soils: process optimization and mechanistic study. Chemosphere, 2020, vol. 239, p. 124707. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124707>

WOOD, Joseph, et al. Decontamination of soil contaminated at the surface with Bacillus anthracis spores using dry thermal treatment. Journal of Environmental Management, 2021, vol. 280, p. 111684. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111684>



WU, Qingru, et al. Temporal trend and spatial distribution of speciated atmospheric mercury emissions in China during 1978–2014. *Environmental science & technology*, 2016, vol. 50, no 24, p. 13428-13435. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04308>

XU, Jiamin, et al. Effect of soil mercury pollution on ginger (*Zingiber officinale* Roscoe): Growth, product quality, health risks and silicon mitigation. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2020, vol. 195, p. 110472. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110472>

XU, Jingying, et al. Sources and remediation techniques for mercury contaminated soil. *Environment International*, 2015, vol. 74, p. 42-53. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.09.007>

XU, Xiaohang, et al. The local impact of a coal-fired power plant on inorganic mercury and methyl-mercury distribution in rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Pollution*, 2017, vol. 223, p. 11-18. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.042>

YIN, Yujun, et al. Adsorption of mercury (II) by soil: effects of pH, chloride, and organic matter. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, 1996. Disponible en: <https://doi.org/10.2134/jeq1996.00472425002500040027x>

YUAN, Qinglin, et al. Facet-dependent selective adsorption of Mn-doped  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocrystals toward heavy-metal ions. *Chemistry of Materials*, 2017, vol. 29, no 23, p. 10198-10205. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b04114>

ZAICA, Yury V.; SIDOROV, Nickolay I.; FOMKINA, Olga V. Identification of hydrogen permeability and thermal desorption parameters of vanadium-based membrane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, no 18, p. 10789-10800. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.176>

ZHANG, Baogang, et al. Microbial community responses to vanadium distributions in mining geological environments and bioremediation assessment. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, vol. 124, no 3, p. 601-615. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2018JG004670>

ZHAO, Cheng, et al. Thermal desorption for remediation of contaminated soil: A review. *Chemosphere*, 2019, vol. 221, p. 841-855. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.079>

ZHAO, Zhong-hua, et al. Remediation of PCB-contaminated soil using a combination of mechanochemical method and thermal desorption. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, no 12, p. 11800-11806. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8734-x>

ZEVENBERGEN, C., et al. Immobilisation of heavy metals in contaminated soils by thermal treatment at intermediate temperatures. En *Studies in environmental science*. Elsevier, 1997. p. 661-672. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0166-1116\(97\)80249-X](https://doi.org/10.1016/S0166-1116(97)80249-X)

ZHANG, Ling, et al. Adsorption behavior and mechanism of Hg (II) on a porous core-shell copper hydroxy sulfate@ MOF composite. *Applied Surface Science*, 2021, vol. 538, p. 148054. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148054>

## VIII. ANEXOS

ANEXOS N° 1:

	<b>FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO</b>
---	---------------------------------------

**TÍTULO:**

<b>DATOS DEL AUTOR: NOMBRE(S)</b>		
<b>PAGINAS UTILIZADAS</b>	<b>AÑO DE PUBLICACION</b>	<b>LUGAR DE PUBLICACION</b>
<b>TIPO DE INVESTIGACION:</b>		
<b>CÓDIGO:</b>		
<b>PALABRAS CLAVES :</b>		
<b>TEMPERATURAS:</b>	ALTAS: MEDIAS: BAJAS	
<b>VENTAJAS Y DESVENTAJAS</b>		
<b>PORCENTAJE DE ELIMINACIÓN</b>		
<b>RESULTADOS :</b>		
<b>CONCLUSIONES:</b>		

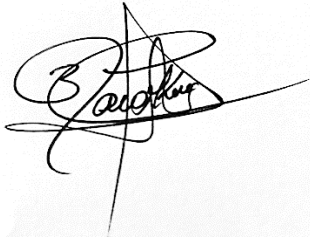


## **Declaratoria de Originalidad del Autor / Autores**

Yo (Nosotros), CANO MAMANI KEVIN RONALD, LUNA MENDOZA BRANDO ENRIQUE estudiante(s) de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA y Escuela Profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO, declaro (declaramos) bajo juramento que todos los datos e información que acompañan al Trabajo de Investigación / Tesis titulado: "TRATAMIENTO TÉRMICO COMO MEDIO DE ELIMINACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS CON MERCURIO: REVISIÓN SISTEMÁTICA", es de mi (nuestra) autoría, por lo tanto, declaro (declaramos) que el Tesis:

1. No ha sido plagiado ni total, ni parcialmente.
2. He (Hemos) mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicado ni presentado anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumo (asumimos) la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

<b>Apellidos y Nombres del Autor</b>	<b>Firma</b>
CANO MAMANI KEVIN RONALD  <b>DNI:</b> 73873512  <b>ORCID:</b> 0000-0002-8842-1373	
BRANDO ENRIQUE LUNA MENDOZA  <b>DNI:</b> 74864050  <b>ORCID:</b> 0000-0001-8640-0512	