



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
AMBIENTAL- RESIDUOS PELIGROSOS

“EVALUACIÓN DEL RIESGO ECOLÓGICO Y A LA SALUD MEDIANTE EL SOFTWARE SADA, ASÍ COMO DETERMINACIÓN DE LA REMOCIÓN DE MERCURIO UTILIZANDO COAGULANTES NATURALES Y COMERCIALES”

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:  
ING. MARIBEL MANZO GARRIDO

TUTOR PRINCIPAL:  
DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM  
COMITÉ TUTOR:  
DRA. MARÍA NEFTALÍ ROJAS VALENCIA, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM  
DRA. MARÍA SOLEDAD CÓRDOVA AGUILAR, INSTITUTO DE CIENCIAS APLICADAS Y  
TECNOLOGÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX., ENERO 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DRA. ROJAS VALENCIA MARÍA NEFTALÍ

Secretario: DR. GARCÍA VILLANUEVA LUIS ANTONIO

1<sup>er.</sup> Vocal: DRA. CÓRDOVA AGUILAR MARÍA SOLEDAD

2<sup>do.</sup> Vocal: M. EN E. ROMERO MARES PATRICIA ISABEL

3<sup>er.</sup> Vocal: DRA. FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ GEORGINA

**Lugar donde se realizó la tesis:**

Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (LISA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

**Tutora de la tesis:**

**Dra. Georgina Fernández Villagómez**

-----

**Firma**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Facultad de Ingeniería y a mi tutora de tesis, la Dra. Georgina Fernández Villagómez, por su apoyo y motivación proporcionada durante la maestría y brindarme las herramientas necesarias para ser mejor profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico durante el estudio de la Maestría, bajo el CVU No. 901527.

Al Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, así mismo, a la Dra. María Soledad Córdova Aguilar por proporcionarme los recursos para la realización del trabajo experimental.

A la M. en C. Elizabeth Hernández Álvarez por su apoyo analítico en la determinación de mercurio por ICP-MS, Instituto de Geofísica, UNAM.

Al Comité Tutoral y Jurado Ampliado: Dra. María Neftalí Rojas Valencia, Dr. Luis Antonio García Villanueva, Dra. María Soledad Córdova Aguilar y M. en E. Patricia Isabel Romero Mares, por sus comentarios y sugerencias en la elaboración de esta tesis.

A Ana Paola Chango por ayudarme con los experimentos y estar ahí sin importar la hora o el día, así como su apoyo incondicional.

A mis profesores: Dra. Ana Elisa Silva Martínez, Dr. Enrique César Valdez, M.I. Alba Beatriz Vázquez González, M.C. Vicente Fuentes Gea y M.E. Patricia Romero, por su enseñanza y sus consejos.

A las personas en general que me ayudaron en esta etapa y no logré mencionar.

## DEDICATORIA

A mi mamá Taurina Garrido y a mi papá Pedro Manzo (Q.E.P.D.) que desde pequeña me han motivado a perseguir mis sueños.

A mis compañeros de la maestría que se convirtieron en mis amigos y mi apoyo emocional y académico durante toda esta etapa. Mauro y Ana, muchas gracias por estar conmigo durante este proceso.

A mis amigos de toda la vida, Yaris, Beto y Maricruz, por estar ahí siempre apoyándome y motivándome.

A Carlos Iván por su apoyo y por darme el empujón que necesitaba para concluir este trabajo de tesis.

“Trabaja, joven, sin cesar trabaja;  
la frente honrada que en sudor se moja,  
jamás ante otra frente se sonroja,  
ni se rinde servil a quien la ultraja”

Elías Calixto Pompa

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. Justificación.....	8
1.2. Objetivos.....	9
1.2.1. Objetivo General.....	9
1.2.2. Objetivos específicos.....	9
1.3. Alcances y limitaciones.....	10
2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. Zona de estudio.....	11
2.1.1. Localización y aspectos generales.....	11
2.1.2. Geología de la zona de estudio.....	12
2.1.3. Historia minera y yacimientos minerales.....	13
2.1.4. Proceso de explotación de mercurio en Querétaro.....	15
2.2. Mercurio.....	17
2.2.1. Propiedades químicas.....	17
2.2.2. Presencia en el ambiente.....	18
2.2.3. Aspectos toxicológicos.....	21
2.2.4. Convenio de Minamata.....	22
2.3. Coagulación-floculación.....	23
2.3.1. Coagulación.....	24
2.3.2. Floculación.....	26
2.3.3. Coagulantes comerciales.....	28
2.3.4. Coagulantes naturales.....	28
2.3.5. Nopal <i>Opuntia ficus-indica</i> .....	29
2.3.6. <i>Moringa oleifera</i> .....	29
2.4. Tratamiento de lodos generados (Solidificación/Estabilización).....	45
2.5. Evaluación de riesgo ecológico y a la salud humana.....	48
2.5.1. Evaluación de riesgo ecológico.....	49
2.5.2. Evaluación de riesgo a la salud humana.....	49
2.5.3. SADA (Spatial Analysis and Decision Assistance).....	52
3. METODOLOGÍA.....	54
3.1. Diseño de experimentos.....	54
3.1.1. Unidad experimental.....	55
3.1.2. Variables de respuesta.....	55
3.1.3. Definición de factores y niveles.....	55
3.1.4. Modelo estadístico.....	55
3.2. Metodología para la prueba de jarras.....	57
3.3. Metodología para la extracción del lixiviado de suelo.....	57
3.4. Metodología para la extracción del mucílago de nopal.....	59
3.5. Metodología para la extracción de la <i>Moringa oleifera</i> .....	59
4. RESULTADOS Y SU EVALUACIÓN.....	60

4.1.	Caracterización del suelo .....	60
4.2.	Caracterización del lixiviado de suelo.....	61
4.3.	Caracterización del agua sintética.....	61
4.4.	Prueba de jarras con agua sintética primera etapa.....	61
4.4.1.	Interacción entre tipo de coagulante y dosis en agua sintética (a) .....	63
4.5.	Prueba de jarras segunda etapa .....	65
4.5.1.	Interacción entre tipo de coagulante y dosis en agua sintética (b) .....	65
4.6	Prueba de jarras utilizando lixiviado de suelo .....	68
5.	ANÁLISIS DE RIESGO.....	71
5.1	Análisis de riesgo ecológico .....	71
5.1.1	Puerta del cielo .....	73
5.1.2	Mina Soledad.....	74
5.1.3	Mina Camargo .....	75
5.2	Análisis de riesgo a la salud .....	77
5.2.1	Puerta del cielo .....	79
5.2.2	Mina Soledad.....	80
5.2.3	Mina Camargo .....	82
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	85
	ANEXOS.....	89
	REFERENCIAS.....	90

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Mapa de localización de la zona de estudio, municipios de Peñamiller y Pinal de Amoles.....	11
Figura 2.3	Diagrama de flujo del proceso de explotación de mercurio.....	15
Figura 2.4	Reacciones de descomposición del cinabrio .....	16
Figura 2.5	Hornos utilizados en la MAPE para extracción de mercurio .....	16
Figura 2.6	Representación de las diferentes formas del mercurio, de izquierda a derecha, mercurio elemental, cinabrio y metilmercurio .....	18
Figura 2.7	Ciclo biogeoquímico del mercurio .....	19
Figura 2.8	Proceso de coagulación-floculación .....	24
Figura 2.9	Teoría de la doble capa .....	25
Figura 2.10	Modelo general de la técnica Solidificación/Estabilización.....	46
Figura 2.11	Etapas del análisis de riesgos .....	48
Figura 2.12	Etapas de la evaluación de riesgo.....	50
Figura 2.13	Coficiente de riesgo para sustancias no cancerígenas .....	52
Figura 2.14	Ícono del software SADA.....	53
Figura 3.1	Metodología general.....	54
Figura 3.2	Metodología general de prueba de jarras .....	57
Figura 3.4	Metodología de extracción de mucílago de nopal.....	59
Figura 3.5	Metodología de extracción de <i>Moringa oleifera</i> .....	59
Figura 4.1	Prueba de jarras en la primera etapa de los experimentos.....	62
Figura 4.2	Evidencia de flóculos con el coagulante natural <i>Moringa</i> .....	62
Figura 4.3	Flóculos formados con el coagulante comercial cloruro férrico.....	62

Figura 4.4 Diagrama de caja de los coagulantes.....	64
Figura 5.1 Valores de referencia ecológicos para el mercurio .....	72
Figura 5.2 Resultados de riesgo ecológico en Puerta del Cielo.....	73
Figura 5.3 Resultados de riesgo ecológico en Puerta del Cielo (cociente de concentraciones).....	74
Figura 5.4 Resultados de riesgo ecológico en Mina Soledad .....	74
Figura 5.5 Resultados de riesgo ecológico en Mina Soledad (cociente de concentraciones).....	75
Figura 5.6 Resultados de riesgo ecológico en Mina Camargo.....	76
Figura 5.7 Resultados de riesgo ecológico en Mina Camargo (cociente de concentraciones).....	76
Figura 5.8 Parámetros de exposición utilizados por el software SADA.....	78
Figura 5.9 Parámetros fisicoquímicos y de toxicidad del contaminante .....	78
Figura 5.10 Distribución de concentración de mercurio en Puerta del Cielo .....	79
Figura 5.11 Resultados del cálculo de riesgo Puerta del Cielo con el software SADA.....	80
Figura 5.12 Distribución de concentración de mercurio en la mina Soledad.....	81
Figura 5.13 Resultados del cálculo de riesgo mina Soledad con el software SADA .....	82
Figura 5.14 Distribución de concentración de mercurio en la mina Camargo .....	83
Figura 5.15 Resultados del cálculo de riesgo mina Camargo con el software SADA.....	84

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Acciones de atención inmediata de México .....	23
Tabla 2.2 Coagulantes naturales.....	30
Tabla 4.1. Caracterización de los suelos.....	60
Tabla 4.2 Resultados de ANOVA interacción entre coagulante y dosis (a).....	63
Tabla 4.3 Comparaciones de tratamientos por pares mediante Tukey para coagulantes ...	64
Tabla 4.4 Resultados de ANOVA interacción entre coagulante y dosis (b).....	65
Tabla 4.5 Comparaciones de tratamientos por pares mediante Tukey para nopal .....	66
Tabla 4.6 Comparaciones de tratamientos por pares mediante Tukey para <i>Moringa oleifera</i> .....	67
Tabla 4.7 Comparaciones de tratamientos por pares mediante Tukey para sulfato de aluminio .....	67
Tabla 4.8 Comparaciones de tratamientos por pares mediante Tukey para cloruro férrico	67
Tabla 4.15 Resultados de la prueba de jarras con el lixiviado de suelo.....	69



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Justificación

El mercurio es un metal tóxico y no esencial para el ser humano, es considerado a nivel mundial como uno de los principales contaminantes que existen en el ambiente. Puede producir daños severos al ser humano afectando especialmente al sistema nervioso, riñón, piel, e incluso puede provocar cáncer (Park y Zheng, 2012; WHO (World Health Organization), 2017).

En el ambiente el mercurio suele existir en concentraciones poco significativas, la cantidad de mercurio que se puede encontrar en suelos contaminados con residuos peligrosos generados por actividad humana puede ser más de 200,000 veces los niveles naturales (ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry), 1999).

Las actividades mineras representan una fuente de entrada importante de mercurio al suelo, debido a que dichas actividades producen cantidades considerables de desechos mineros, los cuales en la mayoría de las ocasiones se abandonan en el medio ambiente sin antes ofrecerles algún tratamiento de remediación (Wang *et al.*, 2012).

Uno de los métodos más utilizados para la remoción de sustancias es el método químico de coagulación-floculación. El cual consiste en la aglutinación de las partículas como consecuencia de la adición de sustancias químicas llamadas coagulantes, sin embargo, en la mayoría de las ocasiones estos coagulantes resultan ser costosos, generan lodos no amigables para el ambiente y suelen desestabilizar el pH de la sustancia tratada (Lorenzo-Acosta, 2006; Choque *et al.*, 2018). A causa de esta situación, se han buscado utilizar otras alternativas más amigables con el ambiente como es el caso de coagulantes naturales, los cuales tienen grandes ventajas con respecto a los sintéticos (Contreras *et al.*, 2015).

## **1.2. Objetivos**

### ***1.2.1. Objetivo General***

- Evaluar el riesgo ecológico y a la salud de la población aledaña a una mina artesanal de mercurio aplicando el software SADA y determinación de la remoción de este contaminante utilizando coagulantes naturales y comerciales que lleven a la mitigación de la exposición del peligro.

### ***1.2.2. Objetivos específicos***

- Caracterizar el riesgo ecológico de la zona de estudio, así como el riesgo a la salud de las personas aledañas a la mina artesanal de mercurio utilizando el software SADA para la toma de decisiones de proyectos futuros.
- Establecer el estado del arte con respecto a la aplicación de los coagulantes naturales para la remoción de turbiedad considerando las investigaciones de los últimos veinte años.
- Determinar la remoción de turbiedad en agua sintética utilizando coagulantes naturales y comerciales, así como un diseño estadístico de experimentos y un probador de jarras, para la definición de la dosis óptima.
- Aplicar la mejor dosis de remoción de turbiedad previamente definida de los coagulantes naturales y comerciales a un lixiviado de suelo conteniendo mercurio utilizando una prueba de jarras para la determinación del porcentaje de disminución del contaminante.

### 1.3. Alcances y limitaciones

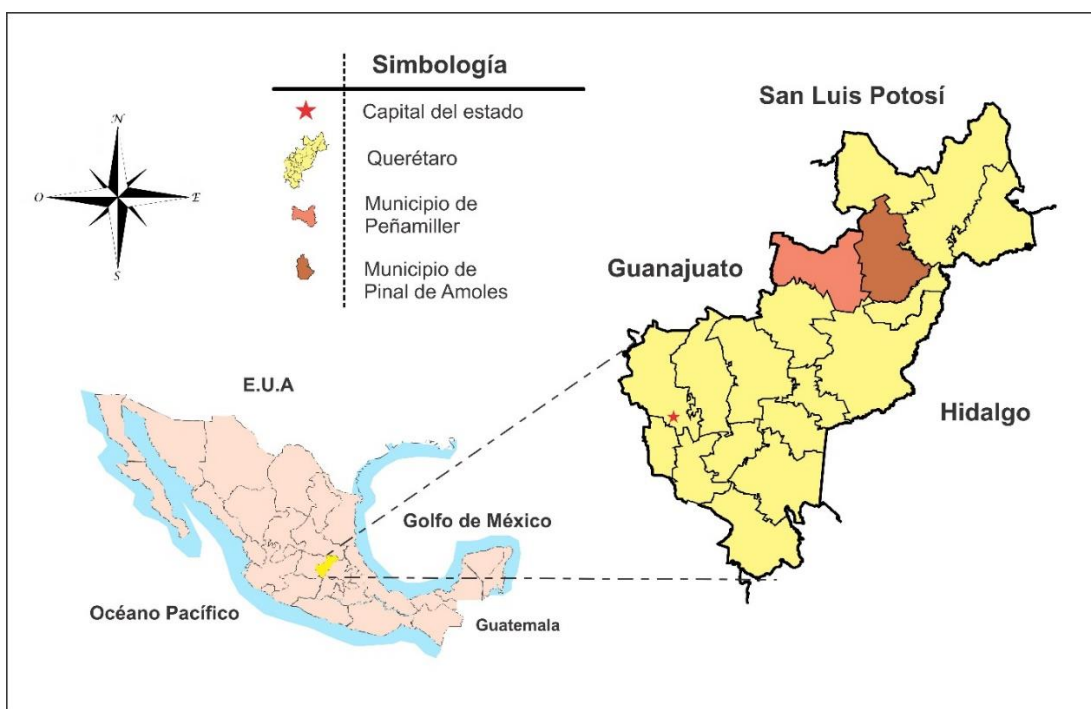
- Las muestras de suelo de la zona de Querétaro fueron recolectadas previamente por otro estudio (Huerta,2020).
- Los coagulantes naturales se obtuvieron del nopal de poda *Opuntia ficus* y la *Moringa oleifera* mediante un proceso desarrollado en el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT).
- Los coagulantes comerciales utilizados fueron el cloruro férrico y sulfato de aluminio.
- Para la determinación de la dosis óptima se preparó agua sintética con un compuesto de mercurio ( $\text{HgSO}_4$ ) y posteriormente se experimentó con el extracto de suelo contaminado.
- El paquete computacional que se utilizó para la caracterización de riesgo ecológico y a la salud fue el software SADA (Spatial Analysis and Decision Assistance).

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Zona de estudio

#### 2.1.1. Localización y aspectos generales

El área de estudio está localizada en el noroeste del estado de Querétaro, en los municipios de Pinal de Amoles y Peñamiller (véase figura 2.1). Ambos municipios se encuentran dentro de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental y de la Mesa del Centro. Presentan un clima de semiseco a semicálido con temperaturas de 12 a 24 °C con una precipitación anual de 400 a 1100 mm. El tipo de suelo dominante en Peñamiller es regosol con ocupación del 1.7% de agricultura, 0.1% de zona urbana y 73% de matorral. Mientras que en Pinal de Amoles el suelo que domina es del tipo leptosol con una ocupación del 11.6% para la agricultura, 0.1% de zona urbana y 47.7 de bosque (INEGI, 2005a; INEGI, 2005b).



**Figura 2.1** Mapa de localización de la zona de estudio, municipios de Peñamiller y Pinal de Amoles (Modificado de INEGI, 2005a; SGM (Servicio Geológico Mexicano), 2019).

### **2.1.2. Geología de la zona de estudio**

La zona de estudio se encuentra dentro de la parte occidental del Cinturón de Pliegues y Cabalgaduras perteneciente a la Sierra Madre Oriental. Esta estructura continental es el resultado de un evento compresivo sucedido a final del Cretácico y hasta el Paleógeno denominado orógeno mexicano. Este evento tectónico desencadenó esfuerzos compresivos y distensivos que dieron como resultado la generación de pliegues, cabalgaduras, fallas y fracturas (Manzo, 2019). Dentro de las principales formaciones estratigráficas en la región se encuentran:

La Formación Las Trancas, la cual está conformada por capas de 1 a 2 metros que contienen micrita fosilífera con radiolarios y se encuentran intercaladas con lutitas calcáreas junto con limolitas levemente apizarradas (Carrasco-Velázquez *et al.*, 2009).

La formación El Doctor que se encuentra conformada por cuatro facies: la caliza Cerro Ladrón, que está constituida por un banco que se formó en agua somera. La caliza La Negra, que se encuentra conformada por capas delgadas con pseudoestratos lenticulares de pedernal intercalados, correspondiente a facies de agua más profunda. La caliza de San Joaquín correspondiente a estratos gruesos con nódulos de pedernal y por último el conglomerado El Socavón que constituye el lado prearrecifal (Wilson *et al.*, 1955).

La formación Soyatal-Mezcala que está integrada por calizas arcillosas sin pedernal, de color gris oscuro y en capas que van de un espesor mediano a delgado (Cortés *et al.*, 2006).

Cuerpos intrusivos de composición granodiorita/diorita, estos se encuentran asociados a la generación de los yacimientos minerales en la zona, la edad de las intrusiones no se ha definido exactamente solo cuenta debido a su posición relativa (SGM, 1998).

### **2.1.3. Historia minera y yacimientos minerales**

La zona de estudio se encuentra ubicada dentro de la Sierra Gorda en el estado de Querétaro, que posee importantes yacimientos de cinabrio, este mineral es considerado la mena principal de mercurio a nivel mundial, debido a que su composición química es sulfuro de mercurio (HgS) de donde el 85% corresponde al metal (Pérez *et al.*, 2013; Higuera, 2018).

El cinabrio fue utilizado durante mucho tiempo en la época prehistórica por diferentes culturas, incluyendo las culturas prehispánicas en México, ya que utilizaban este mineral para ungir a sus muertos puesto que lo relacionaban con la sangre y por lo tanto tenía un valor sagrado (Pérez *et al.*, 2013). Sin embargo, durante la época colonial este mineral empezó a tener un valor comercial debido a que la extracción de metales como la plata en esa época se realizaba principalmente mediante el proceso de amalgamación, en el cual se utilizaba mercurio para realizar la separación del metal precioso de la ganga (Rodríguez, 1985).

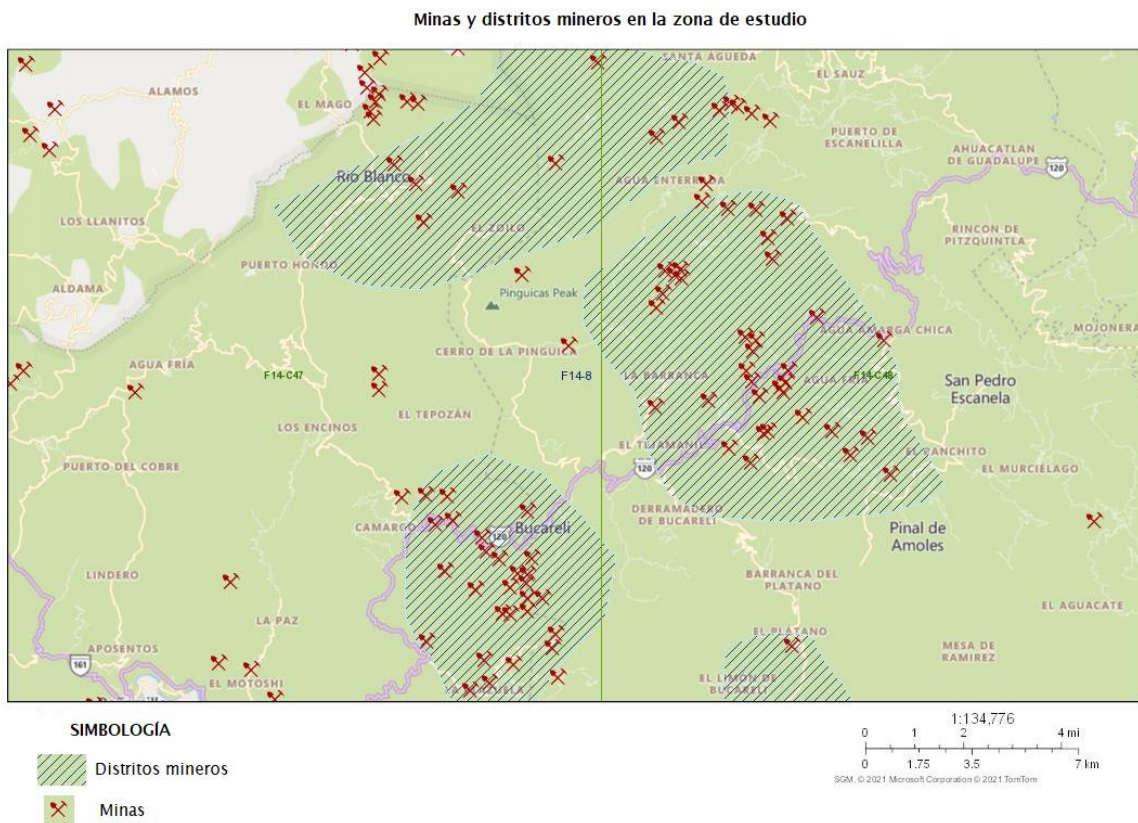
Debido al uso comercial del mercurio en minería como en otras industrias para construir instrumentos como lámparas, termómetros, cosméticos, etc. a lo largo de los últimos años la actividad minera en esta zona se convirtió en una fuente económica importante. Sin embargo, la explotación de este mineral ha conllevado una contaminación preocupante en la zona (Hernández-Silva *et al.*, 2012).

Las localidades mineras en ambos municipios son abundantes debido a que las condiciones geológicas como procesos de sedimentación, vulcanismo y deformación han originado concentraciones de materiales tanto metálicos como no metálicos (Vélez *et al.*, 2007).

La mineralización de mercurio en la zona es la consecuencia del magmatismo en la región, controlada por factores tectónico-estructurales que alojaron el mineral en fallas y fracturas en rocas carbonatadas del Cretácico inferior (Hernández-Silva *et al.*, 2012). Los yacimientos de mercurio en la zona se encuentran en vetas epitermales de calcita con cinabrio y en algunos

casos con mercurio nativo. Los yacimientos se clasifican como hidrotermales de baja temperatura (tipo epitermal). La mena de Hg en esta zona puede ser desde 0.3% hasta el 20% esto depende del cuerpo que se explote, sin embargo, la explotación de mercurio no se rige por la ley mineral sino por otros factores de mercado como la ley de oferta y demanda (Núñez *et al.*, 2007; Vélez *et al.*, 2007).

La figura 2.2 expone la distribución de minas y distritos mineros en la zona de estudio, es importante mencionar que en este mapa además de las minas de Hg también se simbolizan las minas de Ag, Pb, Zn, Au, Cu y Sb además de incluir minas activas e inactivas.



**Figura 2.2** Mapa de localización de minas y distritos mineros dentro de la zona de estudio (Modificado de SGM, 2021).

### 2.1.4. Proceso de explotación de mercurio en Querétaro

El proceso de explotación que se realiza en la región es mediante minas subterráneas, esto debido a la naturaleza del yacimiento además de que la extracción a cielo abierto no es posible por motivos económicos. La minería subterránea se lleva a cabo mediante obras y trabajos en el interior de la tierra donde se realizan pozos, socavones, galerías, túneles, entre otros trabajos con el fin de acceder a la masa mineral y extraerla, sin realizar extracción de los materiales que cubren el yacimiento (Mota, 2015). El procedimiento general de exploración, explotación y beneficio en una mina subterránea se describe en la figura 2.3.

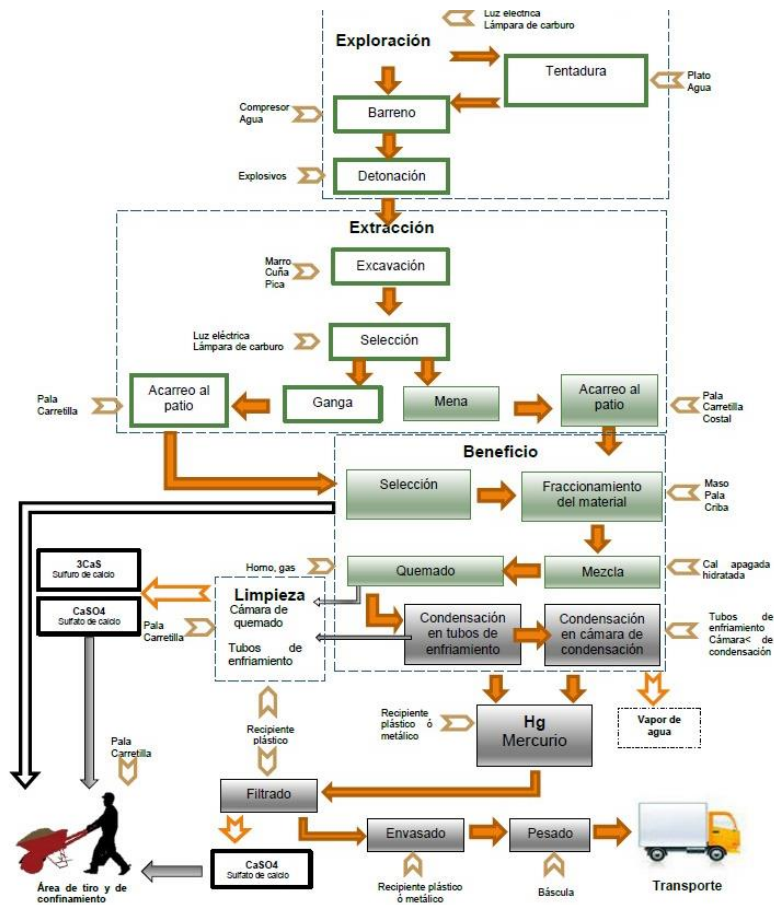
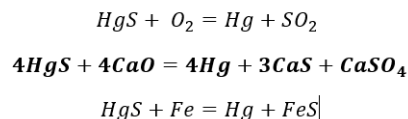


Figura 2.3 Diagrama de flujo del proceso de explotación de mercurio (tomado de Mota, 2015).

Es importante mencionar que durante los procesos de mezcla y quemado se producen las reacciones para la descomposición de cinabrio (véase figura 2.4) las cuales suceden cuando el



mercurio metálico comienza a hervir y evaporar debido a la acción del aire, la cal calcinada y/o el hierro metálico (Mota, 2015).



**Figura 2.4** Reacciones de descomposición del cinabrio (tomado de Mota, 2015).

A pesar de que el procedimiento mencionado en la figura 2.3 es utilizado en la zona de estudio, la minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) predomina de manera significativa, esta última se define de acuerdo con la OMS (2017) como explotación de yacimientos minerales con una gran cantidad de mano de obra con un uso limitado de herramientas mecánicas llevada a cabo normalmente en zonas rurales y con un alto índice de pobreza.

Normalmente el proceso de extracción en la MAPE se realiza con herramientas y procesos técnicos rudimentarios (véase figura 2.5), debido a esto los riesgos asociados con la salud son grandes, debido a la exposición directa de mercurio y otros productos químicos, efectos de ruido y vibración, así como deficiencia en ventilación y uso de equipo inadecuado. Este tipo de prácticas genera condiciones de alto riesgo ocupacional, así como problemas severos al ecosistema y a la población (Español, 2012).



**Figura 2.5** Hornos utilizados en la MAPE para extracción de mercurio (de la Torre, 2017).

## 2.2. Mercurio

### 2.2.1. Propiedades químicas

El mercurio es un elemento metálico que a temperatura ambiente se encuentra de manera líquida, es de color blanco plateado, se volatiliza ligeramente en el ambiente, tiene un punto de fusión de  $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$  y un punto de ebullición de  $357\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Posee un número atómico de 80, su masa atómica es de 200.59 y pertenece a los elementos de transición en la tabla periódica. A  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  tiene una densidad de 13.456 g/ml y se solidifica a una presión de 7640 atmósferas (Yarto *et al.*, 2004; Español, 2012).

También se puede combinar con el azufre y los halógenos de manera rápida a temperatura ambiente y puede formar amalgamas con la mayoría de los metales exceptuando al platino, níquel, cobalto, hierro, cadmio y aluminio. Cuando reacciona con los metales alcalinos produce una reacción exotérmica. Puede ser atacado fácilmente por el ácido nítrico, pero no con otros ácidos como el clorhídrico (Nordberg, 2017).

Dentro de la abundancia de elementos en la corteza ocupa el lugar número 67, no se considera un elemento esencial para los seres vivos, sin embargo, se puede encontrar en suelo, agua y aire. Tiene una tensión superficial alta y es insoluble en agua, alcohol, éter y otros compuestos (Olivares, 2017).

Este elemento puede existir en diferentes formas (véase figura 2.6) , a la forma pura se le conoce como mercurio elemental o metálico, sin embargo, rara vez se encuentra de esta manera, por lo regular es más común que se encuentre en compuestos inorgánicos tales como el sulfuro de mercurio ( $\text{HgS}$ ), óxido de mercurio ( $\text{HgO}$ ) y cloruro de mercurio ( $\text{HgCl}_2$ ) (Nordberg, 2017) y compuestos orgánicos, dentro de estos el más común en el medio ambiente es el metilmercurio esto sucede cuando el mercurio se combina con el carbono y los organismos realizan las transformaciones necesarias para convertir el mercurio elemental en orgánico (USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2020).



**Figura 2.6** Representación de las diferentes formas del mercurio, de izquierda a derecha, mercurio elemental, cinabrio y metilmercurio (Recuperado de Olivares 2017; Gad, 2014).

### **2.2.2. Presencia en el ambiente**

El mercurio se mueve en el medio ambiente tanto en suelo, atmósfera y agua. Las fuentes principales de este elemento se dividen en dos: natural y antropogénica. En el caso de la primera se debe principalmente a actividades geológicas como el vulcanismo, actividades geotermales, yacimientos minerales o rocas y/o suelos con concentraciones elevadas de este metal y eventos de incendios de plantas u árboles que tengan bioconcentrado el Hg y exista una reemisión (Gworek *et al.*, 2017). En el caso de las fuentes antropogénicas son causadas por la combustión de carbón en plantas eléctricas, incineración de residuos, desechos de productos como baterías, termómetros, lámparas, productos odontológicos, etc. así como en la industria minera para la extracción de mercurio, oro y otros metales (Fitzgerald *et al.*, 2007).

La especiación del mercurio permite conocer el comportamiento, movimiento y destino de las diferentes maneras en las que este elemento se presenta en el ambiente y por lo tanto saber su toxicidad ya que el mercurio inorgánico es menos tóxico que en su forma orgánica, las especies de metilmercurio pueden ser desde 10 hasta 100 veces más tóxicas que las especies inorgánicas (Vázquez, 2008).

El ciclo biogeoquímico del mercurio (véase figura 2.7) ayuda a entender las interacciones y el impacto que tiene en el medio ambiente para conocer su comportamiento en los diferentes

medios, así como en sus distintas especies químicas (Government of Canada, 2013). Tiene seis etapas principales las cuales son: 1) Desgasificación de mercurio de rocas, volcanes y actividades antrópicas, 2) Movimiento de este elemento en su forma gaseosa en la atmósfera, 3) Depósito en suelos y agua, 4) Conversión de mercurio en sulfuros, 5) Precipitación o bioconversión a formas más solubles o volátiles (metilmercurio) y 6) Bioacumulación o reemisión a la atmósfera (Cuello, 2015).

Existen dos reacciones que gobiernan el ciclo del mercurio las cuales son la oxidación-reducción y la metilación-desmetilación. En el caso de la primera reacción, el mercurio se oxida a través de la pérdida de electrones pasando a un estado de valencia más alto o lo contrario reducirse pasando a un estado de valencia más bajo. En el caso de la segunda reacción (metilación) el mercurio se transforma en metilmercurio debido a que la especie mercúrica u oxidada gana un grupo del tipo metilo ( $\text{CH}_3$ ) (Government of Canada, 2013).

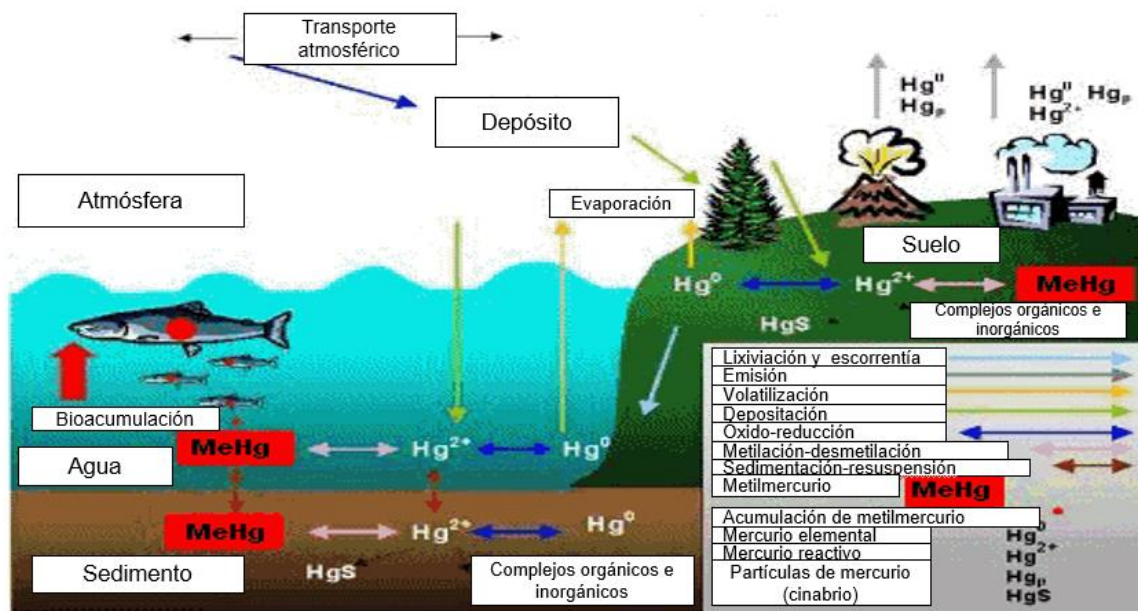


Figura 2.7 Ciclo biogeoquímico del mercurio (Modificado de Government of Canada, 2013).

El mercurio en la atmósfera se presenta en diferentes especies, los procesos que dominan en este entorno son la emisión, transformación, transporte y deposición. Las emisiones a la atmósfera son principalmente naturales como emanaciones volcánicas y antrópicas como procesos industriales de combustión (Gaona, 2004). La concentración de mercurio en el aire depende principalmente de la volatilidad de este, es decir de su especie química, de los procesos de transformación que ocurran y de factores físicos como la temperatura. Debido a la alta volatilidad del mercurio elemental en el aire se presentan en concentraciones mayores sin embargo los compuestos orgánicos también se encuentran en la atmósfera, aunque en menores cantidades representando del 0.3 al 1% de la cantidad total de mercurio en el aire (Gworek *et al.*, 2017).

En el caso del agua la especie química que entra a este sistema es principalmente como  $Hg^{2+}$  y en menor cantidad el metilmercurio que lo hace a través de precipitaciones. Sin embargo, estas especies sufren transformaciones al entrar en contacto con materia orgánica o al experimentar reacciones químicas con otros compuestos por lo que las especies y concentraciones serán diferentes para aguas dulces, subterráneas, oceánicas, etc. (Cuello, 2015).

El mercurio en los suelos es asociado principalmente a procesos biológicos en donde las plantas absorben este compuesto de la atmósfera y posteriormente se deposita en el suelo debido a la descomposición de la materia orgánica (Olivares, 2017). Se ha estimado que la concentración de mercurio en el suelo representa más del 90% del mercurio total en el sistema terrestre y se encuentra asociado a la materia orgánica donde se une fuertemente con grupos reducidos de azufre, sin embargo, las actividades humanas han incrementado significativamente la carga de mercurio en los suelos (Selin, 2009).

### **2.2.3. Aspectos toxicológicos**

El mercurio afecta principalmente al sistema nervioso, sin embargo, cada forma de este elemento lo afecta de manera distinta (ATSDR, 1999). Los principales factores que influyen en la toxicidad del mercurio son la especie química en que se encuentre, la concentración, la ruta de exposición, frecuencia y duración, así como la vulnerabilidad de la persona en el momento de la exposición (Gaioli *et al.*, 2012).

En el caso del mercurio elemental la exposición prolongada a concentraciones altas puede provocar daños severos en el cerebro, riñones y pulmones. La inhalación de vapores de mercurio elemental es mucho más tóxica que la ingestión en su forma líquida, ya que puede provocar vómito, daño pulmonar, daños endobronquial e incluso la muerte. La exposición aguda provoca afectaciones al Sistema Nervioso Central, insuficiencia renal y la muerte. Mientras que la exposición crónica principalmente puede dañar al riñón (Clifton II, 2007).

En el caso de los componentes inorgánicos de mercurio la toxicidad depende de su solubilidad, son mayormente absorbidos por vía oral, en menor cantidad por vía dérmica y en pocas ocasiones por inhalación. La exposición aguda provoca efectos mayores que el mercurio elemental, puede provocar principalmente ardor en el pecho, síntomas gastrointestinales severos, deterioro renal y signos de estomatitis mercurial. Mientras que una exposición crónica afecta directamente al riñón, provocando poliuria, proteinuria y en casos graves síndrome nefrítico con hematuria y anuria (Park *et al.*, 2012).

La toxicidad de los componentes orgánicos en especial del metilmercurio es mayor que el mercurio elemental y en sus formas inorgánicas (Español, 2012). La absorción de este compuesto es principalmente por vía oral y a través de la piel. Debido a que el metilmercurio reacciona con grupos sulfhidrilo que se encuentran en todo el cuerpo este interfiere directamente con la función de cualquier célula (Bernhoft, 2012). Los efectos de exposición de este compuesto pueden ser temblores, sordera, ataxia, necrosis tubular, glomerulonefritis, espasticidad muscular

y muerte. En el caso de la exposición crónica las alteraciones más importantes se relacionan con vulnerabilidad del cerebro infantil o fetal, se considera teratogénico y puede ocasionar retardo mental, también se asocia con mayor riesgo de enfermedades cardiovasculares, además los compuestos orgánicos del mercurio se consideran como posibles efectos cancerígenos en seres humanos (Gaioli *et al.*, 2012).

#### **2.2.4. Convenio de Minamata**

El convenio de Minamata es un tratado mundial para proteger al ambiente y a la salud humana de los efectos del mercurio. Entró en vigor el 16 de agosto del año 2017. Como puntos principales incluye la prohibición de crear nuevas minas de mercurio, eliminación de manera gradual de procesos, productos que involucren este metal, también promueve que exista un control de emisiones a la atmósfera, a la tierra y al agua. Este convenio también tiene la función de almacenar de manera provisional el mercurio, así como su posterior eliminación (PNU, 2017).

Las evaluaciones iniciales del Convenio de Minamata tienen como objetivo que cada país desarrolle perfiles nacionales de mercurio que incluya identificación de las principales fuentes de emisión y liberación, inventarios de compuestos del mercurio, identificación de deficiencias legales, etc. (PNU, 2017). En el caso de México el informe fue realizado por la Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental en conjunto con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, en el informe se describe un perfil general de los sectores mineros, energéticos, económicos, así como ambiental, menciona la metodología para identificación de emisiones y liberación de mercurio, los productos que se utilizan con uso deliberado de mercurio, la regulación que existe, entre otros temas, sin embargo algunas de las acciones de atención inmediata que propone se muestran en la Tabla 2.1

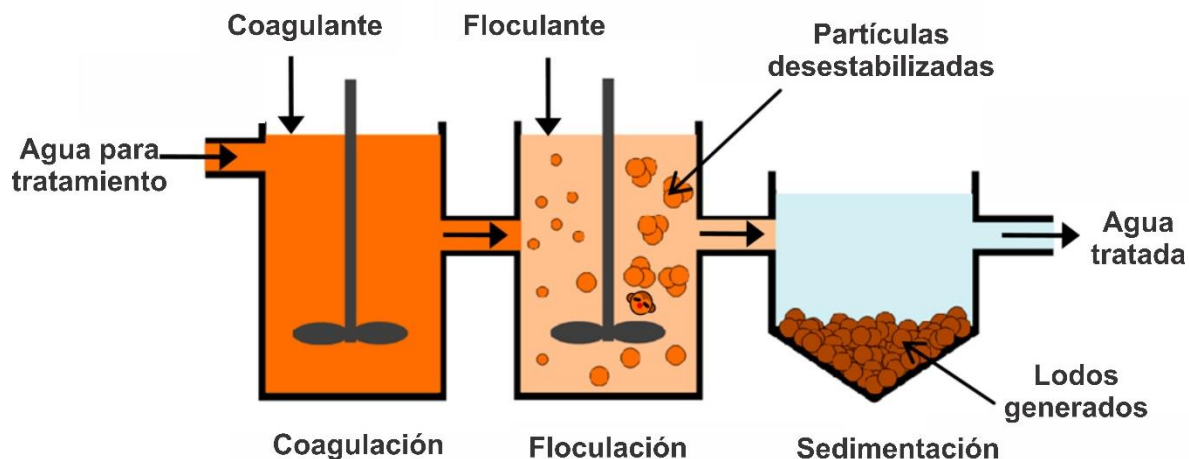
**Tabla 2.1** Acciones de atención inmediata de México (PNU, 2017)

<b>Acciones</b>	<b>Descripción</b>
<b>Normatividad</b>	Se propone la actualización de la NOM-013-SSA2 para amalgamas dentales, en donde se limite el uso de capsulas. La actualización de la NOM-040-ECOL-2002 para cemento hidráulico, en donde se implementen niveles máximos permisibles a la atmósfera y por último se sugiere la implementación de nuevas normas en donde se incluya medición de emisiones y liberación de mercurio en sus diferentes especies químicas.
<b>Gestión</b>	Se recomienda realizar gestiones para no autorizar nuevas actividades mineras o que exista la renovación de las que se encuentran operando. Algunas acciones que se sugieren son: no autorizar exportaciones de mercurio para su uso en minería de oro de tipo artesanal, ubicar sitios donde se almacenen 50 o más toneladas de mercurio, vigilar el comercio del metal, etc.
<b>Planes nacionales</b>	Elaborar y aplicar un plan de acción nacional con el fin de reducir y si es posible eliminar el uso del metal. Controlar y reducir emisiones de mercurio, así como mejores prácticas ambientales para su control, etc.
<b>Diagnóstico de los efectos del mercurio en ambiente y salud</b>	Establecer un programa nacional para realizar la caracterización de la exposición del mercurio, identificar poblaciones vulnerables y a su vez mitigar sus efectos.
<b>Información y difusión del convenio</b>	Toda la información deberá ser compartida entre el gobierno y el público en general
<b>Cooperación internacional sobre el mercurio</b>	Avance en proyectos como la evaluación de la actividad minera artesanal en Querétaro (DGGIMAR)
<b>Otras acciones a mediano y largo plazo</b>	Cambiar la ley minera y exceptuar el mercurio como mineral explotable, actualizar el programa de identificación de sitios contaminados con mercurio, prohibir producción de ciertos productos, fomentar la capacitación de personal médico, etc.

### 2.3. Coagulación-floculación

El proceso de coagulación-floculación consiste de manera general en la desestabilización química de los coloides mediante el aditamento de sustancias químicas llamadas coagulantes, energía de mezclado y posteriormente aglutinación de estas partículas para después eliminar por decantación y filtración (Gómez, 2005) véase figura 2.8.



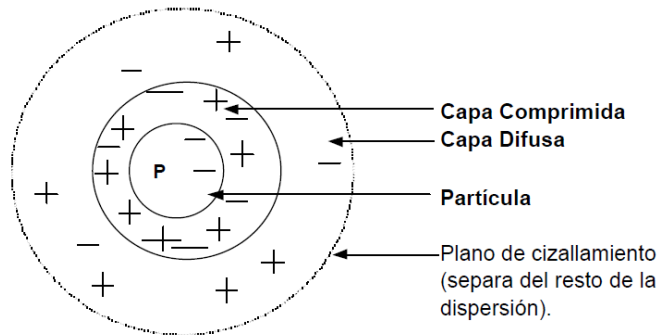


**Figura 2.8** Proceso de coagulación-floculación (Traducido de Teh et al., 2016).

Este proceso es uno de los más utilizados para purificar aguas residuales, de hecho, su aplicación está reportada desde el año 1500 a.C. donde los egipcios utilizaban el sulfato de aluminio para aglomerar partículas suspendidas en el agua. En la actualidad este proceso se ocupa para remover turbiedad, materia orgánica y contaminantes inorgánicos (Teh *et al.*, 2016).

### **2.3.1. Coagulación**

Las aguas naturales o residuales contienen partículas disueltas y en suspensión, éstas últimas tienen tamaños y densidades distintas, en algunos casos se pueden eliminar por sedimentación, pero cuando dichas partículas son muy pequeñas y presentan cargas eléctricas superficiales se repelen impidiendo su aglomeración y por lo tanto la formación de una partícula que pueda sedimentarse (Lorenzo-Acosta, 2006). A estas partículas se les denomina coloides son las responsables de la turbiedad y del color del agua, además pueden ser hidrofílicas e hidrófobas. Normalmente poseen una carga eléctrica negativa en su superficie, por lo cual atraen iones positivos del agua y estos a su vez atraen a iones negativos que se encuentran acompañados de una pequeña cantidad de iones positivos (véase figura 2.9) a esta teoría se le denomina de la doble capa (Andía, 2000).



**Figura 2.9** Teoría de la doble capa (Andía, 2000).

Estas partículas que contienen una doble capa de iones se encuentran dominadas por un potencial el cual se denomina potencial Z. El cual presenta un valor mediante el cual por arriba de este los coloides se encuentran estables y por debajo de este los coloides reducen su repulsión (Castrillón *et al.*, 2012). Si se aumenta la concentración del electrolito se produce una disminución del potencial Z, debido a que un gran porcentaje de la caída del potencial ocurre en la parte inmóvil de la doble capa, esto origina que exista mayor posibilidad de choque entre las partículas (Lorenzo-Acosta, 2006).

Debido a que los coloides presentan una doble capa eléctrica y el potencial Z, se encuentran cargados eléctricamente es difícil desestabilizarlos, por lo tanto, para producir esta desestabilización se agrega un coagulante el cual produce un colapso en la nube de electrones lo que ocasiona que se neutralicen las cargas y por lo tanto las coloides puedan aglomerarse, a este proceso se le conoce como coagulación (Gómez, 2005).

Existen cuatro mecanismos principales de coagulación los cuales son:

#### Modelo físico o de la doble capa

Si dos partículas parecidas se acercan provocan que sus capas difusas interactúen y por lo tanto generen una fuerza de repulsión en donde su potencial será la distancia de ambas, este potencial

caerá rápidamente con el aumento de iones de carga opuesta a la de las partículas, como es el caso de los iones del coagulante (Quispe, 2012)

#### Modelo químico o de puente químico

Si una molécula polimérica se encuentra en el sistema al tener cadenas largas puede retener las partículas coloidales en su estructura dejando sitios libres para adsorber otras partículas, lo que genera un puente químico. Esto hace que se aumente el tamaño y por lo tanto la precipitación sea mejor (Quispe, 2012; Andía, 2000)

#### Neutralización

Mecanismo mediante el cual existe adsorción de contraiones en la superficie de las partículas, es decir existe una desestabilización que puede ocurrir cuando las partículas suspendidas en solución se absorben en iones con carga opuesta. Los coagulantes hidrolizantes pueden resultar efectivos para neutralizar carga superficial negativa de diversos tipos de partículas como bacterias y arcillas (Teh et al., 2016).

#### Floculación de barrido

Ocurre cuando se agrega un coagulante, normalmente una sal metálica a una concentración alta que pueda provocar la precipitación del hidróxido del metal amorfo, las partículas coloidales suelen quedar atrapadas en estos precipitados (Suopajärvi, 2015).

### **2.3.2. Floculación**

Después de realizar la desestabilización de los coloides estos como consecuencia se agrupan debido a la colisión que existe entre ellos, las fuerzas de Van der Waals predominan y se forman flóculos, a este procedimiento se le denomina floculación. Para que los flóculos tengan una buena cohesión es necesario que exista una agitación homogénea y lenta durante el proceso con el objetivo de tener flóculos más estables y fuertes (Castrillón *et al.*, 2012).

El proceso general de floculación se puede dividir en dos etapas:

#### Floculación periquinética (microescala)

En esta etapa la floculación ocurre inmediatamente después de que se realiza la desestabilización y durante la agitación térmica de las moléculas (movimiento browniano). El flóculo que se forma en esta etapa suele tener propiedades de sedimentación muy malas debido a que el proceso se limita al tamaño del flóculo y a otros factores del mismo (Teh *et al.*, 2016).

#### Floculación ortocinética (macroescala)

En esta etapa la floculación se realiza mediante el movimiento del fluido, este normalmente provocado por la agitación mecánica. Debido a que en esta etapa se produce una mayor agregación de partículas para lograr la sedimentación, existe un límite para el gradiente de velocidad de tal forma que puede existir ruptura de los flóculos más grandes y generar flóculos más pequeños (Teh *et al.*, 2016).

En algunos casos para acelerar el proceso de agregación de los coloides o para fortalecer los flóculos, se recurre a la ayuda de floculantes que normalmente son polielectrolitos que mejoran la floculación después de que se realiza la desestabilización por el coagulante, sin embargo, se debe tener mucho cuidado al agregar este tipo de aditamentos debido a que la manipulación del flóculo puede afectar sus propiedades y por lo tanto desestabilizarlo (Bratby, 2016).

Los dos factores más importantes en el proceso de coagulación-floculación son el pH y la dosis del coagulante. Ambos factores se determinan mediante una prueba de jarras con el fin de conocer la dosis óptima al mejor pH, es decir el momento en donde existe mayor remoción de contaminante con la mayor estabilidad de los flóculos formados (Fúquene *et al.*, 2018).

### **2.3.3. Coagulantes comerciales**

Los coagulantes comerciales que se utilizan para realizar la desestabilización de coloides son principalmente sales metálicas como lo son el sulfato de aluminio, aluminato de sodio, cloruro férrico, entre otros. (Andía, 2000). Estos coagulantes son muy usados debido a que tienen una eficiencia alta, son de fácil disponibilidad y además tienen un costo accesible. La propiedad química más relevante de estas sales metálicas es la gran capacidad que tienen de formar complejos polinucleares de carga múltiple en la solución con particularidades de adsorción mejoradas (Bratby, 2016). Sin embargo, estos coagulantes presentan algunas desventajas como lo son: reducen la alcalinidad del agua, modifican el pH y generan grandes cantidades de lodos (Trujillo *et al.*, 2014).

### **2.3.4. Coagulantes naturales**

Debido a los problemas ambientales que se tienen con los coagulantes comerciales se han buscado alternativas con materiales orgánicos ya que además de ser opciones limpias son económicas. Estos materiales son sustancias que normalmente son solubles en agua, tienen una baja probabilidad de modificar el pH del sistema y son biodegradables (Contreras *et al.*, 2015).

Los coagulantes orgánicos más usados son polielectrolitos naturales, que son polímeros extraídos de ciertas plantas o animales, pueden ser polisacáridos, carbohidratos o proteínas. En la industria se utilizan más como floculantes para ayudar al proceso de coagulación en conjunto con coagulantes comerciales, sin embargo, se han realizado investigaciones exitosas de remoción de turbiedad, sólidos disueltos, color, etc. con el uso de coagulantes orgánicos (Trujillo *et al.*, 2014).

El mecanismo principal mediante el cual existe la interacción entre los polímeros orgánicos naturales y las partículas coloidales es principalmente por puenteo, es decir, el polímero se dispersa en la fase acuosa y es adsorbido, forma los puentes y continúa con la adsorción de tal

forma que los puentes al acercarse estos se multiplican y terminan el proceso de adsorción y floculación (Martínez, 2017).

Sin embargo, a pesar de existir una amplia variedad de materiales orgánicos que se pueden utilizar como coagulantes, existen dos que sobresalen del resto debido a su abundancia y su fácil acceso, los cuales son el mucílago de nopal *Opuntia ficus-indica* y la semilla de *Moringa oleifera*.

### **2.3.5. Nopal *Opuntia ficus-indica***

El nopal *Opuntia ficus-indica* pertenece a la familia *Cactaceae* es de origen mexicano y debido a las características morfológicas y fisiológicas que presenta puede vivir en diferentes condiciones ambientales (Olivero *et al.*, 2014).

Los cladodios de nopal están compuestos por casi el 90% de agua sin embargo también contienen fibra, proteína, minerales y una gran cantidad de un polisacárido complejo llamado mucílago, este tiene la función de retener el agua cuando hay periodos de sequía (Becerril, 2020).

El mucílago extraído de esta especie contiene diferentes carbohidratos como l-arabinosa, d-galactosa, l-ramnosa, d-xilosa y ácido galacturónico, de los cuales a este último se le ha atribuido la capacidad de coagulación (Yin, 2010).

### **2.3.6. *Moringa oleifera***

Esta especie es la más conocida y usada alrededor del mundo, pertenece al género Moringácea y tiene diferentes usos, principalmente las vainas y las hojas. Es originaria del noreste de la India y es una planta de origen tropical, por lo que se desarrolla principalmente en climas de semiáridos a semihúmedos (Gómez, 2013).

Esta planta ha sido usada como coagulante en diferentes países debido a sus componentes activos que son péptidos catiónicos presentes en las semillas que se encuentran densamente cargados y pueden realizar la desestabilización de cargas a través de la adsorción y neutralización (Ndabigengesere *et al.*, 1995).

La tabla 2.2 muestra una revisión acerca de los coagulantes naturales estudiados por diversos investigadores a nivel internacional, proporciona datos importantes que pueden ser de utilidad para la investigación como el procedimiento de extracción del coagulante, turbiedad inicial y final, así como la dosis optima del coagulante.

**Tabla 2.2** Coagulantes naturales (elaboración propia)

Nombre del coagulante natural	Tipo de agua	Turbiedad inicial (NTU)	Dosis de coagulante [mg/L]	pH	Origen del coagulante	Procedimiento general de extracción del coagulante	Eficiencia de remoción de turbiedad [%]	Grupo de trabajo	Referencia
Algarrobo ( <i>Ceratonia siliqua</i> )	Agua con caolín	17.50	20.00	10.00	Semillas	Se utilizaron semillas secas, se molieron hasta obtener un polvo fino, se suspendió el polvo en agua destilada y se agitó para extraer el componente activo, se filtró y se obtuvieron las soluciones.	100.00	Serbia	Šćiban et al., 2005
<i>Aloe Vera</i>	Agua sintética	55.00	5	5.00	Mucílago	Las hojas se lavaron, se drenó la aloína, se extrajo el gel el cual se utilizó para coagulación.	51.72	India	Muruganandam et al., 2017
Cactus ( <i>Hylocereus lemairei</i> )	Agua con caolín	30, 40, 50, 60, 70	218, 437, 437, 873, 1090	7.2-7.5	Mucílago	Se eliminó la epidermis y la parte central de la penca, solo quedando la parte semisólida. Se pesó y se sometió a un proceso de licuado con agua destilada, se filtró y se obtuvo una solución acuosa para la realización de las pruebas.	94.53-98.20	Venezuela	Mendoza et al., 2008

Nombre del coagulante natural	Tipo de agua	Turbiedad inicial (NTU)	Dosis de coagulante [mg/L]	pH	Origen del coagulante	Procedimiento general de extracción del coagulante	Eficiencia de remoción de turbiedad [%]	Grupo de trabajo	Referencia
<i>Cactus latifaria</i>	Agua con caolín	50-100	44105.00	7.00	Cladodios	Se lavaron, secaron y se molieron, posteriormente se tamizaron y se les agregó agua. Otra parte se trató con disolvente. En ambos casos se pusieron en agitación, los sólidos se secaron y se preparó la solución agua.	83.30	Venezuela y UK	Diaz et al., 1999
Calabaza hiedra ( <i>Coccinia indica</i> )	Agua con caolín	100.00	0.40	7.50	Mucilago	Los frutos se lavaron, se cortaron en trozos, se remojaron en agua destilada, el mucilago se filtró en tela de muselina y se extrajo mediante adición de alcohol. El precipitado se lavó con acetona, se secó y se filtró.	94.00	India	Patale et al., 2012
Cáscara de plátano	Agua residual sintética	85.60	1000.00	8.00	Cáscaras	Las cáscaras se secaron, se calentaron en horno, se trituraron y se molieron.	90.42	India	Chitra et al., 2020
Cáscara de plátano ( <i>Musa acuminata</i> )	Agua residual	71.66	0.40	7.70	Cáscara	Las cáscaras de plátano se cortaron en trozos, se lavaron, se secaron al sol luego en horno, se trituraron hasta obtener un polvo fino.	59.60	India	Maurya et al., 2018
<i>Cassia fistula</i>	Agua de canal	120.00	20.00	7.20	Semillas	Las semillas se recolectaron, se secaron al sol, se molieron hasta obtener un polvo fino y se preparó la solución.	95.00	Colombia	Guzmán et al., 2015



Nombre del coagulante natural	Tipo de agua	Turbiedad inicial (NTU)	Dosis de coagulante [mg/L]	pH	Origen del coagulante	Procedimiento general de extracción del coagulante	Eficiencia de remoción de turbiedad [%]	Grupo de trabajo	Referencia
Castaño de indias ( <i>Ae. Hippocastanum</i> )	Agua con caolín	17.3, 35, 70	2	10.00	Semillas	Las semillas se recolectaron localmente, se molieron hasta tener un polvo fino, se tamizaron, se prepararon en una solución con agua o con NaCl, se agitó, se suspendió y se filtró.	80-50	Serbia	Šćiban et al., 2009
Castaño europeo ( <i>C. sativa</i> )	Agua con caolín	17.3, 35, 71	NA	10.00	Semillas	Las semillas se recolectaron localmente, se molieron hasta tener un polvo fino, se tamizaron, se prepararon en una solución con agua o con NaCl, se agitó, se suspendió y se filtró.	NA	Serbia	Šćiban et al., 2009
Cenizas volantes	Agua residual sintética	85.60	800.00	8.00	Cenizas	Las cenizas se lavaron y se dejaron en reposo con agua, se filtró, se calentó y se trituró hasta obtener un polvo fino.	96.49	India	Chitra et al., 2020
<i>Corchorus tridens</i>	Agua de río	632.00	130.00	7.00	Hojas	Las muestras se compraron en el mercado local, se secaron en el sol, se pulverizaron hasta obtener un polvo fino.	87.30	Nigeria	Jodi et al., 2012
Falsa acasia ( <i>Robinia pseudoacacia</i> )	Agua con caolín	70.00	30.00	10.00	Semillas	Se utilizaron semillas secas, se molieron hasta obtener un polvo fino, se suspendió el polvo en agua destilada y se agitó para extraer el componente activo, se filtró y se obtuvieron las soluciones.	60.00	Serbia	Šćiban et al., 2005

Nombre del coagulante natural	Tipo de agua	Turbiedad inicial (NTU)	Dosis de coagulante [mg/L]	pH	Origen del coagulante	Procedimiento general de extracción del coagulante	Eficiencia de remoción de turbiedad [%]	Grupo de trabajo	Referencia
Falso índigo ( <i>Amor-pha fruticosa</i> )	Agua con caolín	17.50	5.00	10.00	Semillas	Se utilizaron semillas secas, se molieron hasta obtener un polvo fino, se suspendió el polvo en agua destilada y se agitó para extraer el componente activo, se filtró y se obtuvieron las soluciones.	80.00	Serbia	Šćiban et al., 2005
Flor de jamaica ( <i>H. sabdariffa</i> )	Agua de río	632.00	130.00	7.10	Hojas	Las muestras se compraron en el mercado local, se secaron en el sol, se pulverizaron hasta obtener un polvo fino.	82.60	Nigeria	Jodi et al., 2012
Frijol de Egipto ( <i>Peels of Hyacinth Bean</i> )	Agua superficial de lago	500.00	20.00	9-9.5	Cáscaras	Las cáscaras de frijol se secaron al sol, al horno, se molieron y posteriormente se tamizaron.	99.14	India	Shilpa et al., 2012
Frijoles ( <i>Phaseolus vulgaris</i> )	Agua con caolín	17.50	5.00	10.00	Semillas	Se utilizaron semillas secas, se molieron hasta obtener un polvo fino, se suspendió el polvo en agua destilada y se agitó para extraer el componente activo, se filtró y se obtuvieron las soluciones.	80.00	Serbia	Šćiban et al., 2005
Garbanzo ( <i>Cicer arietinum</i> )	Agua de curtido	NA	0.20	5.50	Semillas	A las semillas se les retiró la cáscara, se molieron hasta obtener un polvo fino, y se tamizaron.	81.20	India	Kazi et al., 2013

Nombre del coagulante natural	Tipo de agua	Turbiedad inicial (NTU)	Dosis de coagulante [mg/L]	pH	Origen del coagulante	Procedimiento general de extracción del coagulante	Eficiencia de remoción de turbiedad [%]	Grupo de trabajo	Referencia
Garbanzo ( <i>Cicer arietinum</i> )	Agua artificial	95, 49, 31	100.00	N.A	Semillas	El polvo de garbanzo se compró en un mercado local y solo se procuró tener granos menores a 600 micras después se solubilizó para obtener el ingrediente activo.	95.89, 81.63, 71.29	Bangladesh	Asrafuzzaman et al., 2011
<i>Guar gum</i>	Pozo poco profundo	49, 24, 7, 3, 3	50, 50, -, 100, 50	6.5-8.7	Semillas	Se seleccionaron las semillas de mejor calidad, se molieron, se tamizaron y se preparó la solución con agua destilada.	96, 52, -, 71, 100	Malawi y UK	Pritchard et al., 2009
Hojas de nim ( <i>Azadirachta indica</i> )	Agua residual	71.66	1.00	7.70	Hojas	Las hojas se lavaron con agua, se secaron al sol y se molieron hasta obtener un polvo fino.	43.96	India	Maurya et al., 2018
<i>J. curcas M.</i>	Pozo poco profundo	49, 24, 7, 3, 2	50, 50, 50, 50, 50	6.5-8.6	Semillas	Se seleccionaron las semillas de mejor calidad, se molieron, se tamizaron y se preparó la solución con agua destilada.	95, 45, 10, 71, 88	Malawi y UK	Pritchard et al., 2009
<i>Jatropha curcas</i> Piñón de tempate	Agua residual	402.00	100.00	6.00	Semillas	La pasta que se utilizó se obtuvo de extraer el aceite de las semillas.	84.96	Pakistan y Arabia Saudita	Ali et al., 2019
Maíz	Agua de lago	15.00	60.00	7.90	Semillas	La semilla se limpió y se secó en un horno, posteriormente se molieron en un triturador y se mezclaron en una tela para obtener un polvo fino, se le agregó agua destilada para completar la solución incluyendo HCl como conservante.	95.33	India y UK	Mandloi et al., 2004

Nombre del coagulante natural	Tipo de agua	Turbiedad inicial (NTU)	Dosis de coagulante [mg/L]	pH	Origen del coagulante	Procedimiento general de extracción del coagulante	Eficiencia de remoción de turbiedad [%]	Grupo de trabajo	Referencia
Mangle Zaragoza ( <i>Conocarpus erectus</i> )	Agua residual	402.00	50.00	7.00	Semillas	Las semillas se molieron y se tamizaron hasta obtener un polvo muy fino previamente tamizado.	93.43	Pakistan y Arabia Saudita	Ali et al., 2019
Mango	Agua con caolín	90.00	0.50	13.00	Hueso (semilla)	Se recolectó, se le quitó la cáscara superior y se usó agua destilada para lavar el hueso, posteriormente se secó en horno, se trituró, tamizó y el polvo resultante se disolvió en agua, se agitó para extraer el ingrediente activo, se filtró y se guardó.	98.65	Pakistan	Qureshi et al., 2011
<i>Moringa oleifera</i>	Agua de río	632.00	130.00	6.10	Semillas	Las muestras se compraron en el mercado local, se secaron en el sol, se pulverizaron hasta obtener un polvo fino.	99.00	Nigeria	Jodi et al., 2012
<i>Moringa oleifera</i>	Río y embalse	23-90	50.00	7.4-8.2	Semillas	Semillas secas molidas en una licuadora con accesorio para café. Se le agregó agua destilada para obtener una solución al 5% de moringa. Se mezcló y se agitó hasta obtener una suspensión, se filtró y se obtuvo la solución madre.	26.5-83.3	Malasia	Muyibi et al., 1995

Nombre del coagulante natural	Tipo de agua	Turbiedad inicial (NTU)	Dosis de coagulante [mg/L]	pH	Origen del coagulante	Procedimiento general de extracción del coagulante	Eficiencia de remoción de turbiedad [%]	Grupo de trabajo	Referencia
<i>Moringa oleifera</i>	Agua de grifo con caolín	105.00	50 con cáscara 500 sin cáscara	7.60	Semillas	Semillas secas, se utilizaron con y sin cáscara, se molieron en una licuadora hasta obtener polvo fino, se extrajeron los agentes activos con agua común, se extrajo y se le añadió agua, se mezcló y posteriormente se filtró.	90.00	Canadá	Ndabigengesere et al., 1998
<i>Moringa oleifera</i>	Agua de río	21.6-36, 61.2-77.4, 163-202	10, 40, 100	6.9-7.5	Semillas	Semillas secas, se les quito el recubrimiento, se secaron y se pulverizaron en una licuadora. Se extrajo el aceite usando un aparato y un disolvente. Se le agregó agua se mezcló y se filtró.	88, 95, 98	Malasia	Muyibi et al., 2003
<i>Moringa oleifera</i>	Agua de lago	15.00	30.00	7.90	Semillas	La semilla se limpió y se secó en un horno, posteriormente se molieron en un triturador y se mezclaron en una tela para obtener un polvo fino, se le agregó agua destilada para completar la solución incluyendo HCl como conservante.	99.30	India y UK	Mandloi et al., 2004

Nombre del coagulante natural	Tipo de agua	Turbiedad inicial (NTU)	Dosis de coagulante [mg/L]	pH	Origen del coagulante	Procedimiento general de extracción del coagulante	Eficiencia de remoción de turbiedad [%]	Grupo de trabajo	Referencia
<i>Moringa oleifera</i>	Agua de río	50.00	90.00	7.30	Semillas	Se introdujeron las semillas en un extractor, se utilizó una relación de 1 gramo de sólido por 20 ml de solvente.	92.00	Cuba	Rodríguez et al., 2005
<i>Moringa oleifera</i>	Agua de río	74.6, 383	40, 170	7.3, 7.4	Semillas	Se quitó la cáscara que envuelve a las semillas, se molió el grano hasta obtener polvo fino, se extrajo el aceite del polvo utilizando hexano y un soxhlet electrotérmico. El polvo resultante se pesó y se le añadió agua destilada, se mezcló, se filtró y se preparó la solución.	90, 98	Malasia y Sudáfrica	Liew et al., 2006
<i>Moringa oleifera</i>	Agua con caolín	75, 150	500, 400	6.7, 7.5	Semillas	Las semillas se molieron en un molino tradicional hasta obtener un polvo fino, se disolvió en agua destilada, se filtró y se preparó la solución madre.	80.1, 94.3	Venezuela	Caldera et al., 2007
<i>Moringa oleifera</i>	Pozo poco profundo	49, 24, 7, 3,1	250, 250, 100, 100, 50	6.5-8.5	Semillas	Se seleccionaron las semillas de mejor calidad, se molieron, se tamizaron y se preparó la solución con agua destilada.	100, 99, 75, 93, 100	Malawi y UK	Pritchard et al., 2009

Nombre del coagulante natural	Tipo de agua	Turbiedad inicial (NTU)	Dosis de coagulante [mg/L]	pH	Origen del coagulante	Procedimiento general de extracción del coagulante	Eficiencia de remoción de turbiedad [%]	Grupo de trabajo	Referencia
<i>Moringa oleifera</i>	Agua de río	43.9, 91, 333	0.05, 0.15, 0.30	7.00	Semillas	Se utilizaron semillas secas, para la extracción del aceite se realizó en un electrotérmico utilizando hexano, el sobrante se mezcló con fosfato para obtener el compuesto activo, se agitó, centrifugó y por último el sobrenadante se inyectó en una columna de intercambio iónico para separar los constituyentes bioactivos.	95.5, 98.5, 99.3	Malasia	Ali et al., 2009
<i>Moringa oleifera</i>	Agua de curtido	NA	0.60	4.50	Semillas	Las semillas se quitaron de las vainas, se secaron al sol y se trituraron hasta obtener un polvo fino posteriormente se tamizaron.	82.02	India	Kazi et al., 2013
<i>Moringa oleifera</i>	Agua artificial, agua de cuerpos naturales, agua híbrida	146, 45.4, 160	50, 250, 1000	7.50	Semillas	Las semillas se descascaron, se molieron para obtener un polvo fino, se tamizaron, se humedeció para crear una pasta y luego se diluyó, se agitó y se sedimentó, posteriormente se extrajo el sobrenadante para su dosificación.	84, 74, 97.2	UK y Malawi	Pritchard et al., 2010

Nombre del coagulante natural	Tipo de agua	Turbiedad inicial (NTU)	Dosis de coagulante [mg/L]	pH	Origen del coagulante	Procedimiento general de extracción del coagulante	Eficiencia de remoción de turbiedad [%]	Grupo de trabajo	Referencia
<i>Moringa oleifera</i>	Agua artificial	100, 48, 25	100.00	N.A	Semillas	Las semillas se secaron al sol, se quitó la cáscara, se trituraron hasta obtener un polvo fino y después se solubilizó para obtener los ingredientes activos de la semilla.	94.1, 69.37, 60	Bangladesh	Asrafuzzaman et al., 2011
<i>Moringa oleifera</i>	Agua subterránea	12.40	50.00	7.00	Semillas	Las semillas se descascararon, se trituraron hasta obtener un polvo fino, el cual se usó como coagulante.	72.00	India	Sapana et al., 2012
<i>Moringa oleifera</i>	Agua de ciénega	56.50	750-850	7.20	Semillas	Las semillas se descascararon, se trituraron, molieron hasta obtener un polvo fino previamente tamizado, se extrajo la grasa y se empaco y almaceno para su posterior uso.	63.50	Colombia	Meza-Leones et al., 2018
<i>Moringa oleifera</i>	Agua residual sintética	85.60	600.00	6.00	Semillas	Las semillas se lavaron, se secaron al sol, luego en horno, se trituraron, molieron hasta obtener un polvo fino.	85.75	India	Chitra et al., 2020
<i>Moringa oleifera</i>	Agua residual	402.00	50.00	6.00	Semillas	Las semillas se molieron y se tamizaron hasta obtener un polvo muy fino previamente tamizado.	79.65	Pakistán y Arabia Saudita	Ali et al., 2019
<i>Moringa oleifera</i>	Agua sintética	55.00	15.00	6.00	Semillas	Las semillas se secaron, se descascararon, se molieron hasta obtener un polvo muy fino.	62.36	India	Muruganandam et al., 2017



Nombre del coagulante natural	Tipo de agua	Turbiedad inicial (NTU)	Dosis de coagulante [mg/L]	pH	Origen del coagulante	Procedimiento general de extracción del coagulante	Eficiencia de remoción de turbiedad [%]	Grupo de trabajo	Referencia
<i>Moringa oleifera</i>	Agua residual	26.00	2000.00	4.50	semillas	Las semillas se secaron, se limpiaron, molieron y tamizaron hasta obtener un polvo fino, posteriormente se le quitó el aceite, se extrajo el coagulante activo, se licuo, agitó, y se filtró con tela de muselina.	88.30	Malasia, Nigeria y UK	Jagaba <i>et al.</i> , 2020
<i>Moringa oleifera</i>	Agua cruda	29.00	50.00	7.00	Semillas	A las semillas se les retiraron las vainas, se secaron en un horno, se molieron hasta obtener un polvo fino, se tamizó, se agregó agua, se agitó y se filtró para obtener la solución.	88.70	Zimbabue, Botsuana, Sudáfrica	Gandiwa <i>et al.</i> , 2020
Neem ( <i>Azadirachta indica</i> )	Agua residual	402.00	200.00	6.00	Semillas	Las semillas se molieron y se tamizaron hasta obtener un polvo muy fino previamente tamizado.	97.23	Pakistan y Arabia Saudita	Ali <i>et al.</i> , 2019
Nopal <i>Opuntia</i>	Agua de curtido	NA	0.40	5.50	Mucilago	Se preparó polvo seco del nopal, para esto se cortaron las pencas, se secaron, se tritularon y posteriormente se tamizó.	78.54	India	Kazi <i>et al.</i> , 2013
Nopal <i>Opuntia</i>	Agua de canal	171.00	90.00	7.5-7.9	Mucilago	Las pencas fueron lavadas, peladas y cortadas. Posteriormente se secaron, deshidrataron, se tritularon y el polvo se tamizó se le agregó un solvente para extraer la materia prima.	72.00	Colombia	Vllabona <i>et al.</i> , 2013

Nombre del coagulante natural	Tipo de agua	Turbiedad inicial (NTU)	Dosis de coagulante [mg/L]	pH	Origen del coagulante	Procedimiento general de extracción del coagulante	Eficiencia de remoción de turbiedad [%]	Grupo de trabajo	Referencia
Nopal <i>Opuntia</i>	Agua superficial de lago	500.00	20.00	9-9.5	Mucilago	El polvo seco se preparó cortando las pencas, se secaron, se molieron y se tamizaron.	99.74	India	Shilpa et al., 2012
Nopal <i>Opuntia</i>	Agua residual	310.00	70.00	7.3-7.4	Mucilago	El polvo de nopal se extrajo mediante la tecnología de secado solar de los cladodios.	91.60	México	Vaca-Mier et al., 2014
Nopal <i>Opuntia</i>	Agua de río	276.00	18.63-21	6.6-6.9	Mucilago	A las pencas del nopal se les quitó la epidermis, posteriormente se coró en trozos pequeños, se lavaron, se secaron, se trituraron y se tamizó. Para realizar la extracción se usaron solventes y finalmente se secó al vacío.	93,25	Colombia	Olivero et al., 2013
Nopal <i>Opuntia</i>	Agua sintética	55.00	40.00	7.00	Mucilago	Las pencas se lavaron, se les quitó la cubierta exterior, se secó, se trituró hasta tener un polvo fino.	50.50	India	Muruganandam et al., 2017
Nopal <i>Opuntia</i>	Agua sintética	200.00	50.00	44477.00	Mucilago	Se seleccionaron cladodios de buen estado, se quitó las espinas y la epidermis, se cortó el tejido parenquimatoso, se colocaron en capsulas de Petri. Posteriormente se secaron, el tejido deshidratado se trituró, se tamizó hasta obtener un polvo fino se preparó la solución con agua destilada.	90.00	Venezuela	Caldera et al., 2019

Nombre del coagulante natural	Tipo de agua	Turbiedad inicial (NTU)	Dosis de coagulante [mg/L]	pH	Origen del coagulante	Procedimiento general de extracción del coagulante	Eficiencia de remoción de turbiedad [%]	Grupo de trabajo	Referencia
Nopal <i>Opuntia</i>	Agua cruda	29.00	55.00	7.00	Mucílago	Las pencas se lavaron con agua destilada, se cortaron, se hornearon, se molieron, tamizaron y se agregaron con agua, se agitó y se filtró.	89.40	Zimbabue, Botsuana, Sudáfrica	Gandiwa et al., 2020
Piñón de Pino	Agua sintética	67-75	0.50	2 y 12	Piñón	Los piñones se secaron al sol, se lavaron, se introdujeron al horno, se trituraron, se lavaron y secaron en horno de nuevo, se trituraron hasta obtener un polvo fino, se lavó para eliminar color y acidez, se mezcló con agua, se agitó y la solución sobrenadante se utilizó como coagulante previamente filtrado.	82.00	Pakistan	Hussain et al., 2019
<i>Prosopis juliflora</i>	Agua con caolín	30.00	20-40	7.00	Semillas	Se lavaron, secaron y se molieron, posteriormente se tamizaron y se les agregó agua. Otra parte se trató con disolvente. En ambos casos se pusieron en agitación, los sólidos se secaron y se preparó la solución agua.	80-90	Venezuela y UK	Diaz et al., 1999
Quitosano	Lavandería de hospital	53.50	60.00	6.00	Gel de quitosano natural	Disolución con ácido acético, mezcla con agitación magnética, mezcla con agua y glicerol, agitación y calentado.	35.00	Brasil	Abreu et al., 2020

Nombre del coagulante natural	Tipo de agua	Turbiedad inicial (NTU)	Dosis de coagulante [mg/L]	pH	Origen del coagulante	Procedimiento general de extracción del coagulante	Eficiencia de remoción de turbiedad [%]	Grupo de trabajo	Referencia
Quitosano	Agua de lago	15.00	0.15	7.40	Escamas	Se disolvieron las escamas en ácido acético, se agitó y la solución se completó a 1 litro.	93.30	India y UK	Mandloi et al., 2004
Quitosano	Agua residual	26.00	400.00	4.50	Polvo comercial	Se compró el polvo y se preparó la solución, se agitó para asegurar la disolución.	98.35	Malasia, Nigeria y UK	Jagaba et al., 2020
Quitosano/hidroxiapatita	Lavandería de hospital	53.50	50.00	6.00	Biocompuesto obtenido de conchas de cangrejo	Extracción de carne, trituración de conchas, lavado y secado natural. Deshidratación de cáscaras, molienda y lavado con etanol, hidróxido de sodio y agua. Se añadió ácido sulfúrico y posteriormente el biopolímero.	67.00	Brasil	Abreu et al., 2020
Roble cabelludo ( <i>Q. cerris</i> )	Agua con caolín	17.3, 35, 73	NA	10.00	Semillas	Las semillas se recolectaron localmente, se molieron hasta tener un polvo fino, se tamizaron, se prepararon en una solución con agua o con NaCl, se agitó, se suspendió y se filtró.	NA	Serbia	Šćiban et al., 2009
Roble común ( <i>Q. robur</i> )	Agua con caolín	17.3, 35, 72	0.5	10.00	Semillas	Las semillas se recolectaron localmente, se molieron hasta tener un polvo fino, se tamizaron, se prepararon en una solución con agua o con NaCl, se agitó, se suspendió y se filtró.	65-40	Serbia	Šćiban et al., 2009

Nombre del coagulante natural	Tipo de agua	Turbiedad inicial (NTU)	Dosis de coagulante [mg/L]	pH	Origen del coagulante	Procedimiento general de extracción del coagulante	Eficiencia de remoción de turbiedad [%]	Grupo de trabajo	Referencia
Roble rojo americano ( <i>Q. rubra</i> )	Agua con caolín	17.3, 35, 74	NA	10.00	Semillas	Las semillas se recolectaron localmente, se molieron hasta tener un polvo fino, se tamizaron, se prepararon en una solución con agua o con NaCl, se agitó, se suspendió y se filtró.	NA	Serbia	Šćiban et al., 2009
Semillas de papaya ( <i>Carica papaya</i> )	Agua residual	71.66	0.80	7.70	Semillas	Las semillas se secaron a temperatura ambiente, se trituraron hasta obtener un polvo fino.	41.89	India	Maurya et al., 2018
Semillas de tamarindo	Agua residual sintética	85.60	400.00	8.00	Semillas	Las semillas se lavaron, se secaron al sol, luego en horno, se trituraron, molieron hasta obtener un polvo fino.	61.33	India	Chitra et al., 2020
Tallo del plátano ( <i>Musa acuminata</i> )	Agua residual	71.66	10.00	7.70	Tallo	El tallo se cortó en trozos, se trituró, la medula tritura se filtró, se recolectó el jugo y se refrigeró.	18.78	India	Maurya et al., 2018
Zarandaja ( <i>Dolichos lablab</i> )	Agua artificial	100, 49, 35	100.00	N.A	Semillas	Se secaron las semillas, se descascararon, se obtuvo un polvo fino después de moler, se añadió agua destilada, se agitó, se filtró y se preparó la solución.	88.9, 68.16, 60.85	Bangladesh	Asrafuzzaman et al., 2011

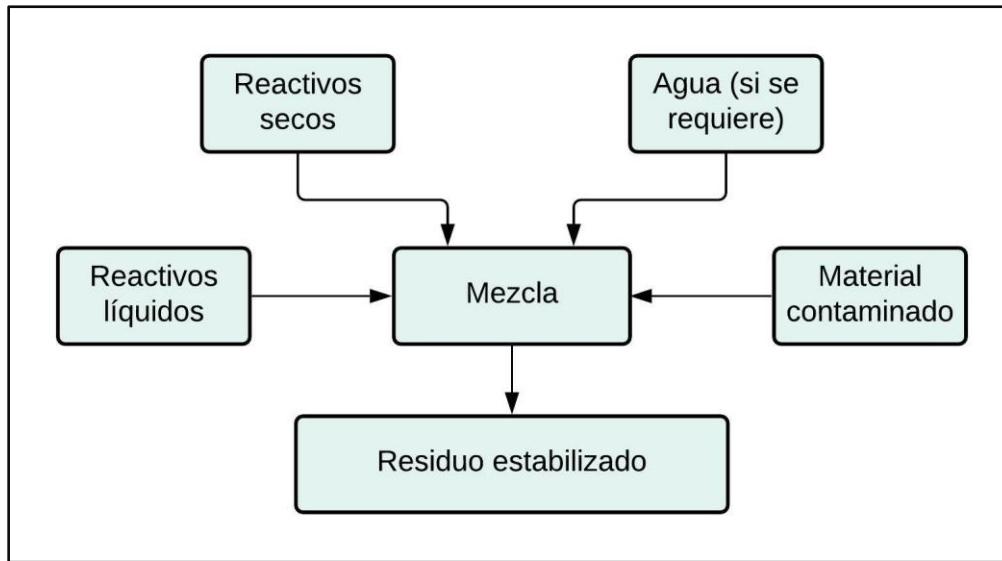
Es importante mencionar que para realizar la compilación de la información proporcionada en la Tabla 2.3 se consideraron algunos factores importantes como lo son: que tuvieran al menos un 90% de los datos que se especifican en la tabla, el pH se consideró el óptimo o en su caso el del agua original pero no pasó por algún cambio y no se consideró la extracción de los coagulantes con soluciones salinas a menos que se especifique debido a que este factor de acuerdo a lo leído afectaba de manera positiva los resultados de turbiedad.

Del análisis que se realizó de esta tabla se observa que los países que realizan mayor investigación en cuanto a coagulantes naturales son los que se ubican geográficamente en el continente de Asia, esto debido a que muchas de las especies que se utilizan como coagulantes son originarios de estos lugares. Otro punto importante por mencionar es que en la mayoría de los casos el procedimiento de extracción del coagulante es el mismo con algunas variaciones.

Por último, cabe destacar que el coagulante natural más utilizado a nivel internacional es la *Moringa oleifera* ya que ha presentado una alta eficiencia de remoción de turbiedad, así como de metales y otros compuestos inclusive en la mayoría de los artículos utilizan esta especie como valor de referencia para comparar la remoción de otros coagulantes.

#### **2.4. Tratamiento de lodos generados (Solidificación/Estabilización)**

El proceso de solidificación/estabilización (S/E) es un método no destructivo que se utiliza para inmovilizar materiales peligrosos en una matriz disminuyendo su superficie y la permeabilidad de estos. Este procedimiento está formado por dos etapas, la primera se refiere a la solidificación, la cual consiste en aglutinar o encerrar los contaminantes dentro de un material sólido, la segunda etapa llamada estabilización consiste en limitar la movilidad de los contaminantes mediante la adición de materiales, la técnica se describe de manera general en la Figura 2.10 (Wang et al., 2012).



**Figura 2.10** Modelo general de la técnica Solidificación/Estabilización (Modificada de USEPA, 2007).

Esta técnica se utiliza para tratar suelos o lodos contaminados con compuestos inorgánicos específicamente algunos metales como el mercurio. La S/E se puede realizar *in situ* o *ex situ*, para el primer caso se utilizan sistemas para cubrir los suelos que se encuentran contaminados sin realizar un proceso de excavación mientras que en el segundo caso el material debe extraerse para posteriormente tratarse y después disponerlo (Volke et al., 2002).

De acuerdo con la USEPA (2007) este proceso se ha utilizado para tratar desechos contaminados con mercurio a escala piloto y en estudios de laboratorio, estos últimos con el fin de encontrar los aglutinantes o reactivos más efectivos. De acuerdo con la metodología presentada por esta institución el proceso puede realizarse utilizando como aglutinantes al cemento Portland, compuestos de sulfuro y fosfato, resinas de poliéster, etc. Es importante mencionar que en esta técnica se pueden incluir agentes de ajuste de pH o de compuestos que reduzcan el tiempo de fraguado de la mezcla con el fin de aumentar la resistencia a la compresión y reducir el proceso de lixiviación de los contaminantes.

En un estudio reportado por Zhang y Bishop (2002) se ha demostrado la eficiencia de esta técnica para remediar desechos con mercurio de concentraciones de hasta 1000 mg/kg utilizando cemento y carbón activado pasando la prueba lixiviación con excelentes resultados.

Por otro lado, en un trabajo presentado por Zhuang et al. (2004) se demostró la eficiencia de este procedimiento utilizando cemento y lignina férrica para estabilizar contaminantes de mercurio con una gran capacidad de lixiviación de los lodos de purificación de salmuera generados a partir del proceso de electrólisis de celda de Hg en cloro. La eficacia de la estabilización se probó mediante pruebas de lixiviación y los resultados mostraron una reducción de mercurio después del tratamiento de  $188 \mu\text{gL}^{-1}$  a  $17.2 \mu\text{gL}^{-1}$ .

Fuhrmann et al. (2002) muestran la efectividad de esta técnica para inmovilizar desechos de mercurio contaminado con material radiactivo el cual utilizan como aglutinante el cemento polimérico de azufre. El objetivo del estudio fue tratar estos desechos de tal forma que no se lixiviaran o se dispersaran. Los resultados después de la prueba de lixiviación expusieron una concentración promedio de 25.8 mg/L, con algunas muestras muy por debajo del nuevo estándar de tratamiento universal EPA de 25 mg/L. El vapor de los desechos tratados en las pruebas promedió  $0.6 \text{ mg/m}^3$ .

Algunas de las ventajas de utilizar esta técnica para tratar residuos contaminados con mercurio son: reducción de lixiviación del metal, estabilización del compuesto, costos bajos y tiempo de realización de corto a moderado además de protección a la salud humana y al ambiente. Sin embargo, también presenta algunas desventajas como lo son el aumento de volumen debido a los materiales utilizados, la no eliminación total del contaminante y el tener que realizar la disposición final del producto estabilizado. También es importante mencionar que la aplicabilidad de esta técnica dependerá de la especie química en la que se encuentre el mercurio ya que su movilidad en el entorno será diferente y por lo tanto los compuestos y las condiciones fisicoquímicas serán distintas (USEPA, 2007)



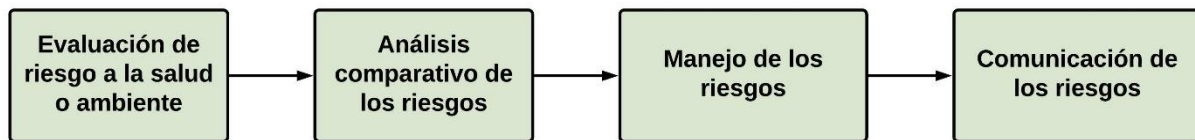
## 2.5. Evaluación de riesgo ecológico y a la salud humana

De acuerdo con USEPA (2021) el riesgo se define como la probabilidad que tiene la exposición a un factor de estrés ambiental a dar como resultado efectos nocivos a la salud humana o a los sistemas ecológicos. Dicho factor puede ser cualquier entidad física, química o biológica que altere de manera negativa al ser humano o a los recursos naturales específicos, ecosistemas completos, incluidas plantas y animales, así como el medio ambiente con el que interactúan.

El riesgo comprende el concepto de exposición a un peligro, este último se define como la probabilidad que existe ante la ocurrencia de un fenómeno que puede ser potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo de tiempo en un sitio específico. La exposición al peligro puede ser voluntaria o involuntaria, los efectos negativos dependerán de la toxicidad de la sustancia, de la dosis y del tiempo y frecuencia de la exposición (INECC, 2021).

El riesgo se suele expresar en términos de probabilidad, por ejemplo, el riesgo de una persona en un millón se expone como  $10^{-6}$ , riesgos menores a este último valor se han considerado como no preocupantes, sin embargo, debido a la naturaleza de los datos no siempre el valor del riesgo se puede considerar como un dato absoluto ya que los cálculos se realizan mediante estimaciones o aproximaciones (INECC, 2021).

El análisis de riesgos está compuesto por cuatro etapas, las cuales se describen en la figura 2.11:



**Figura 2.11** Etapas del análisis de riesgos (modificado de USEPA, 2021).

La USEPA (2021) utiliza la evaluación de riesgo para realizar la caracterización y conocer la magnitud del riesgo a la salud humana y a los receptores ecológicos como plantas y animales (riesgo ecológico).

### **2.5.1. Evaluación de riesgo ecológico**

La evaluación de riesgo ecológico es un proceso mediante el cual se puede evaluar la probabilidad en la que el medio ambiente se ve afectado como resultado a la exposición de uno o más factores ambientales estresantes, como lo pueden ser productos químicos, especies invasoras, cambios en el uso de suelo, enfermedades, entre otras (USEPA, 2022).

La evaluación de riesgo ecológico está compuesta por tres etapas principales, las cuales se definen de la siguiente manera (USEPA, 1998):

La primera es la formulación del problema, en esta etapa se define el propósito de la evaluación, así como el plan para analizar y caracterizar el riesgo. También se realiza la integración de la información disponible sobre fuentes, efectos, factores de estrés, así como características del receptor y el ecosistema.

La segunda etapa denominada de análisis está dirigida a evaluar los datos con el fin de determinar la caracterización de la exposición y la caracterización de los efectos ecológicos, es decir determinar la exposición, el potencial y el tipo de efectos ecológicos que se pueden esperar, así como determinar sus fortalezas y limitaciones.

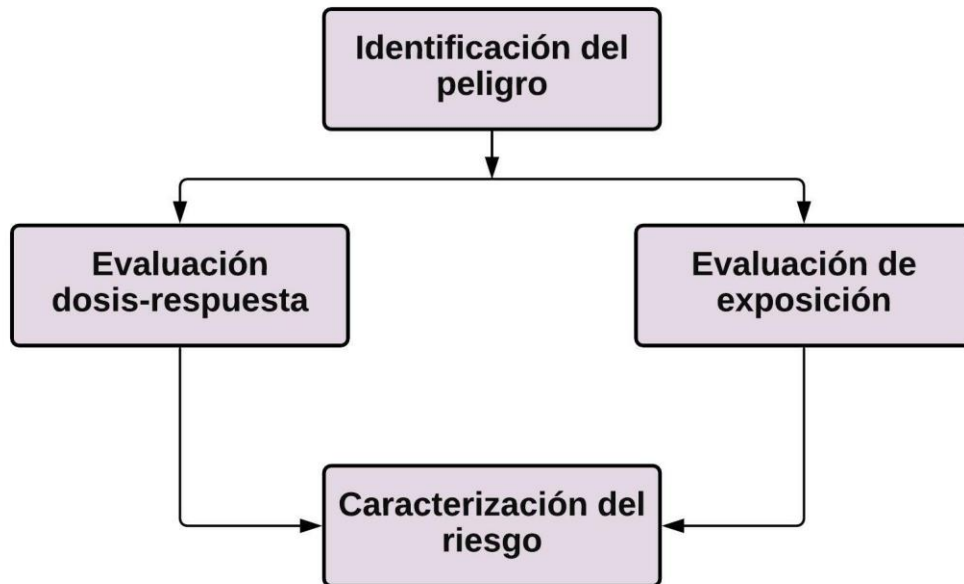
Por último, en la tercera etapa nombrada como la caracterización del riesgo se analizan los datos con el fin de caracterizar la naturaleza de la exposición potencial o real y determinar respuestas ecológicas bajo las circunstancias definidas en el concepto.

### **2.5.2. Evaluación de riesgo a la salud humana**

La evaluación de riesgo para la salud humana es un proceso destinado a estimar el riesgo para un organismo o población determinado, que toma en cuenta las características del sistema, del

lugar, así como la exposición de algún agente en particular que pueda tener efectos negativos o consecuencias significativas sobre la población o el organismo (WHO, 2010).

El proceso de evaluación de riesgos está compuesto por cuatro etapas las cuales se muestran en la figura 2.12.



**Figura 2.12** Etapas de la evaluación de riesgo (modificado de USEPA, 2021).

La identificación del peligro es la primera etapa en el proceso de evaluación de riesgo, en esta fase se identifica el contaminante específico para determinar si la exposición a este puede tener un efecto potencial dañino en la salud humana. Se establece la toxicidad del contaminante basado en estudios toxicológicos y/o epidemiológicos, se identifica si la sustancia es posible cancerígena, así como los posibles efectos adversos sobre la salud, también se examinan las propiedades químicas y físicas de la sustancia, se reconocen los posibles receptores, ya sea una población, comunidad u organismo de manera individual y por último se verifica si existe alguna interacción entre la sustancia y el ambiente (WHO, 2010).

La evaluación dosis-respuesta es la etapa en la cual se determina la proporción que existe entre la sustancia tóxica a la cual un organismo o población se encuentran expuestos y la incidencia y severidad de una respuesta o efecto. Uno de los enfoques calcula la probabilidad que se tiene de contraer cáncer mientras que el otro enfoque está relacionado con los efectos que se tiene a la salud no relacionados con el cáncer. Esta relación de la dosis-respuesta puede variar con respecto al tipo de contaminante, la sensibilidad del organismo, así como el tipo de efecto de salud (INECC, 2010; EPA, 2021).

Evaluación a la exposición es la tercera etapa y se estima la exposición que ha tenido el contaminante en términos de un periodo de tiempo específico, así como la cantidad de personas que han sido expuestas a dicha sustancia. También se debe identificar las rutas de exposición o de ingesta al cual puede estar sujeto un individuo o población, éstas pueden ser por inhalación, ingestión o contacto dérmico. Se definen las vías de exposición que pueden ser aire, suelo, agua, comida o productos de consumo. Se determina la duración de la exposición, así como la concentración de la sustancia (WHO, 2010).

Por último, la caracterización del riesgo presenta la información de manera diferente con el fin de explicar los efectos que este puede tener en individuos o poblaciones. En esta etapa se combinan los resultados de las tres etapas anteriores con el fin de describir el tipo de riesgo y tomar las medidas necesarias para su mitigación. El riesgo se puede cuantificar, en el caso de que los efectos sean cancerígenos riesgos menores a  $10^{-6}$  se consideran como no preocupantes. En el caso de efectos no cancerosos se utilizan cocientes de peligro los cuales consideran los efectos que puede tener una sustancia a los órganos del cuerpo humano, en este caso un índice de Peligro (HI) de 1 o menor a 1 será considerado como poco probable que la sustancia tóxica tenga un efecto adverso a la salud no cancerígeno durante el tiempo de exposición previamente estudiado (USEPA, 2021).

Para realizar el cálculo de riesgo a la salud se utiliza la ecuación establecida por la USEPA (1991) mostrada en la figura 2.13, el riesgo total de efectos no cancerígenos se establece en un HI o HQ de 1 para cada sustancia química en un medio en particular, por lo que valores menores a 1 serán considerados como no peligrosos o seguros.

Esta ecuación (véase figura 2.13) se basa en reflejar el riesgo de la exposición a una sustancia química, dada una ruta específica, un medio y un uso de suelo (en este caso uso residencial). Este último parámetro dependerá de la zona en la que se realice el estudio, de acuerdo con la USEPA (1991) existen dos usos principales de suelo, el primero se clasifica como uso residencial el cual considera condiciones específicas de tiempo de exposición, rutas, etc. El segundo tipo de suelo es el comercial o industrial y está considerado para suelos que solo se utilizan para cuestiones laborales, por lo tanto, las condiciones de exposición son diferentes al de uso residencial.

$$HQ = \frac{Cx10^{-6}kg/mgxEFxIF}{RfD_0xATx365días/año}$$

De donde:

C: Concentración química en el suelo (mg/kg)

EF: Frecuencia de exposición (días/año)

IF: Factor de ingestión de suelo ajustado por edad (mg-año/kg-día)

RfD<sub>0</sub>: Dosis de referencia crónica oral (mg/kg-día)

AT: Tiempo medio (año)

**Figura 2.13** Coeficiente de riesgo para sustancias no cancerígenas (modificado de USEPA, 1991)

### **2.5.3. SADA (*Spatial Analysis and Decision Assistance*)**

SADA (*Spatial Analysis and Decision Assistance*) es un software gratuito desarrollado por la Universidad de Tennessee que tiene como objetivo proporcionar herramientas eficaces para la resolución de problemas ambientales, dentro de estas herramientas se encuentran los módulos de visualización, análisis geoespacial, análisis estadístico, evaluación de riesgo a la salud

humana, evaluación de riesgo ecológico, análisis de costo/beneficio, diseño de muestreo y análisis de decisiones (véase figura 2.14).



**Figura 2.14** Ícono del software SADA

Los modelos de riesgo utilizados por el software SADA siguen el modelo de la guía de evaluación de riesgos de la USEPA para Superfund (RAGS) y pueden ser modificados por el usuario para adaptarlos al sitio de estudio. Existen dos parámetros como producto del modelo. El primero es un valor de detección que se denomina valor de remediación preliminar (PRG). Este valor es el límite de concentración mediante el cual se pueden identificar contaminantes de interés. Los contaminantes con valores de muestra por encima de este límite se consideran contaminantes de interés y se trasladan a la investigación. El software SADA puede ejecutar los cálculos de PRG y a su vez identificar los contaminantes que sean de interés en formato tabular y de manera automática. También el software puede mostrar de manera gráfica los datos espaciales con el fin de visualizar en donde se encuentran las concentraciones que superan el límite de concentración propuesta previamente. El segundo resultado es la evaluación de riesgo para el contaminante de interés. En esta etapa, la concentración de exposición es calculada en función de la estadística del conjunto de datos y como producto se obtiene el riesgo asociado a un individuo o a una población. El riesgo total se puede calcular debido a la exposición de un contaminante o a múltiples contaminantes a la vez (Stewart *et al.*, 2006).

### 3. METODOLOGÍA

La metodología general propuesta para este trabajo se describe en la Figura 3.1. La cual consistió en la revisión bibliográfica respecto al tema, la evaluación de riesgo ecológico y a la salud, posteriormente el diseño de experimentos, después la caracterización del lixiviado de suelo y la prueba de jarras, por último, la evaluación de los resultados.

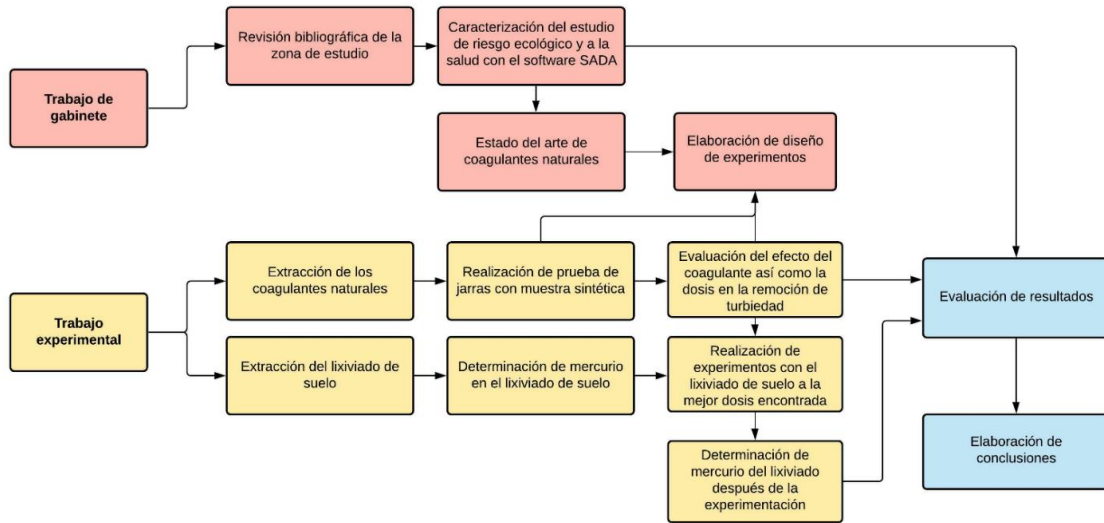


Figura 3.1 Metodología general (elaboración propia)

#### 3.1. Diseño de experimentos

Un experimento se puede definir como una prueba o una serie de pruebas en las cuales se pueden realizar cambios deliberados en las variables de entrada de un sistema, con el fin de observar o identificar los motivos de estos cambios que pueden observarse en la respuesta de salida (Montgomery, 2004). El diseño experimental se define como un arreglo de unidades experimentales en el cual se controla el error experimental y acomoda los tratamientos. El diseño totalmente aleatorizado es aquel al cual a cada unidad experimental se le asigna un tratamiento al azar (Kuehl, 2001).

En este trabajó se optó por aplicar un diseño completamente al azar debido a la naturaleza del experimento y a continuación se describen todos sus componentes.

### **3.1.1. Unidad experimental**

Para esta tesis la unidad experimental considerada es el vaso de precipitado de un litro conteniendo agua sintética preparada con un compuesto de mercurio y con cierta turbiedad específica.

### **3.1.2. Variables de respuesta**

Primero se medirá como variable de respuesta el porcentaje de remoción de turbiedad debido a que es más económico que medir la concentración final del mercurio, esta última solo se medirá al tratamiento que haya presentado la mayor remoción de turbiedad en todo el experimento.

### **3.1.3. Definición de factores y niveles**

Los factores que se definieron fueron dos, el primero definido como el tipo de coagulante con cuatro niveles: mucílago de nopal, *Moringa oleifera*, sulfato de aluminio y cloruro férrico. El segundo factor definido por la dosis de coagulante con seis niveles, considerando las siguientes dosis: 10, 20, 30, 40, 50 y 60 mg/L para la primera fase de los experimentos.

Para el caso de la segunda fase de los experimentos se consideraron los mismos factores, es decir el tipo de coagulante y la dosis de coagulante. Para el primer factor (coagulante) se consideraron cuatro niveles: mucílago de nopal, *Moringa oleifera*, sulfato de aluminio y cloruro férrico. Para el segundo factor (dosis de coagulante) se consideraron seis niveles: 50, 200, 500, 1000, 2000 y 5000 mg/L.

Para ambos experimentos, primera y segunda fase, se consideró realizar tres repeticiones por cada tratamiento.

### **3.1.4. Modelo estadístico**

Para la elección del diseño experimental primero se definió la estructura de diseño la cual se determinó en diseño completamente al azar.



A continuación, se presenta el modelo elegido para el diseño estadístico de experimentos general, que se ocupó para los dos experimentos realizados con el fin de conocer la interacción entre el tipo de coagulante y la mejor dosis:

Modelo: Factorial 4x6 en diseño completamente al azar

$$Y_{ijk} = \mu + d_i + r_j + dr_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

$Y_{ijk}$  Es el valor de turbiedad

$\mu$  Es la media general del valor de turbiedad

$d_i$  Es el efecto de la i-ésimo coagulante.  $i=1,2,3,4$

$r_j$  Es el efecto de la j-ésima dosis de coagulante.  $j=1,2,3,4,5,6$

$dr_{ij}$  Es el efecto de la interacción de la i-ésimo coagulante y la j-ésima dosis de coagulante.  
 $i=1,2,3,4; j=1,2,3,4,5,6$

$\varepsilon_{ijk}$  Error aleatorio observado del k-ésima muestra al aplicar la i-ésimo coagulante en la j-ésima dosis de coagulante  $i=1,2,3,4; j=1,2,3,4,5,6, k=1,2,3$

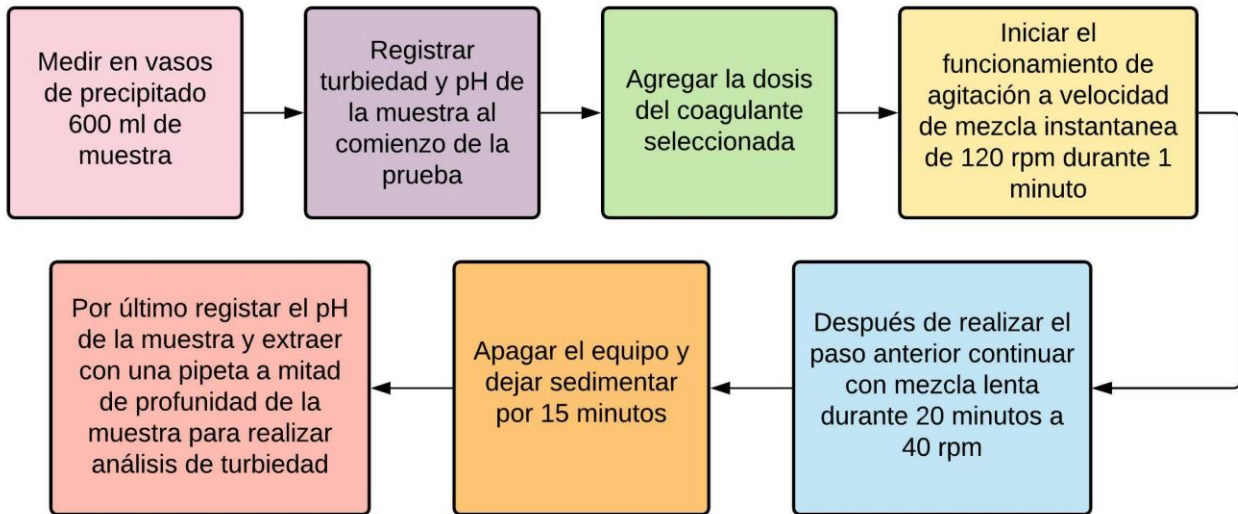
### **Hipótesis por probar**

$H_0$ : No hay efecto de interacción entre el tipo de coagulante y la dosis de coagulante

$H_1$ : Hay efecto de interacción entre el tipo de coagulante y la dosis del coagulante

### 3.2. Metodología para la prueba de jarras

La metodología de prueba de jarras que se presenta en la figura 3.2 está basada y modificada de los procedimientos establecidos en ASTM-D2035.

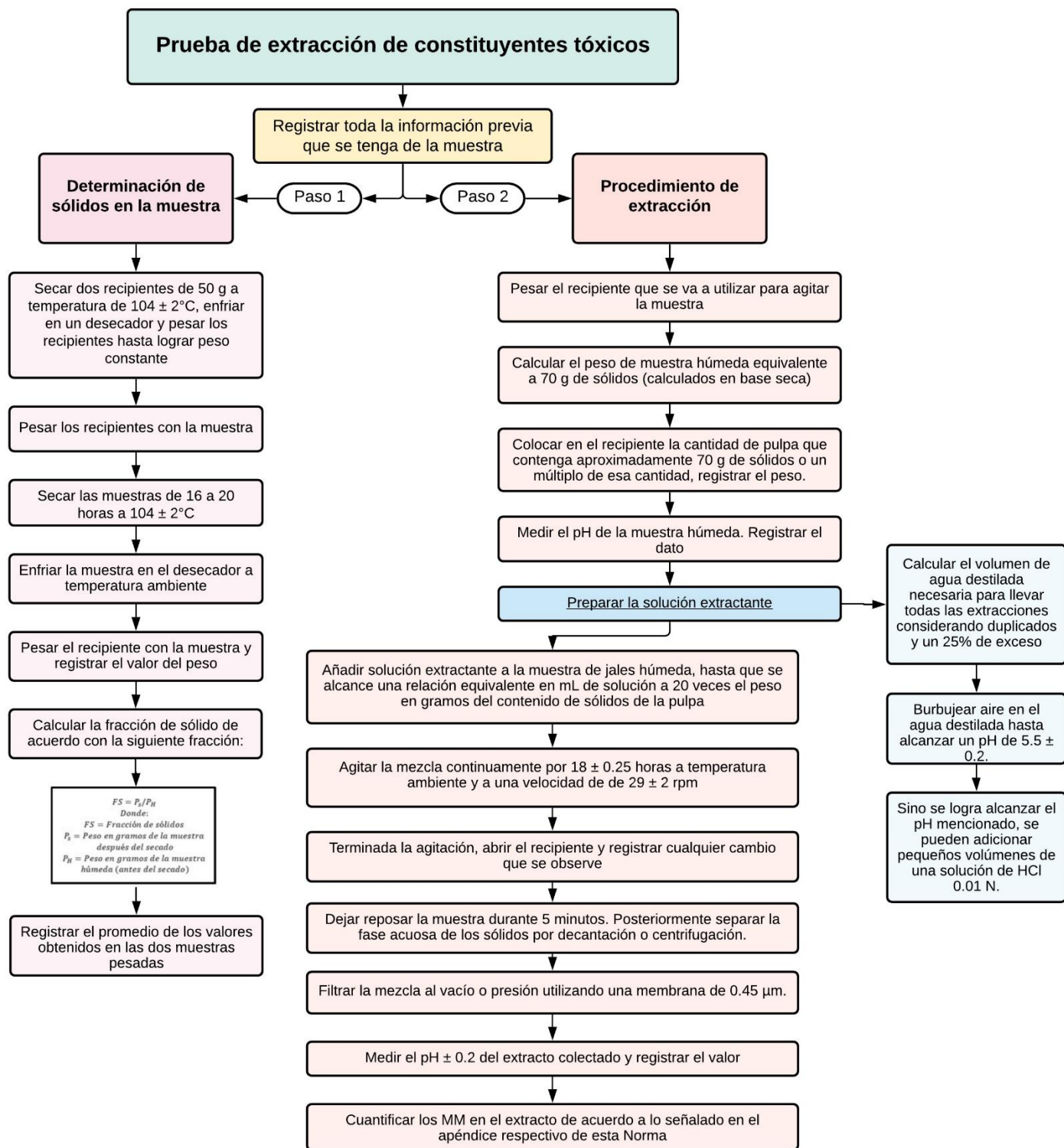


**Figura 3.2** Metodología general de prueba de jarras (Modificado de ASTM-D2035)

La medición de turbiedad se realizó en un turbidímetro HACH 2100Q IS portátil. Mientras que, para la medición de mercurio en el lixiviado de suelo, así como en el agua sintética se realizó por el método Espectrometría de masas con fuente de plasma acoplado inductivamente (por sus siglas en inglés ICP-MS), modelo iCAP Qc de la marca Thermo Scientific, en el Laboratorio ICP-MS del Instituto de Geofísica de la UNAM.

### 3.3. Metodología para la extracción del lixiviado de suelo

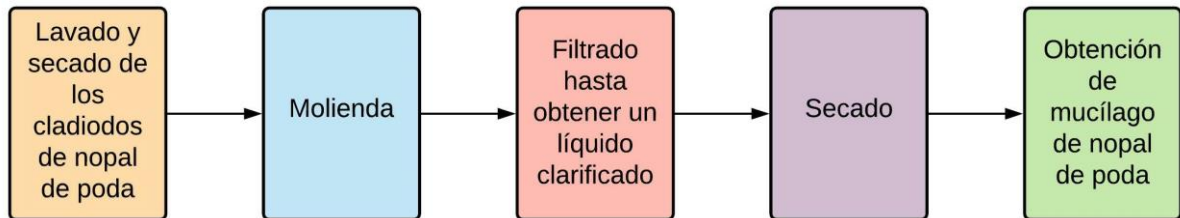
La metodología para realizar la extracción de los lixiviados de suelo (jales mineros) se describe de acuerdo con la NOM-141-SEMARNAT-2003 la cual establece el procedimiento que se debe seguir para realizar la caracterización de los jales, así como otros criterios especificados en la misma. Esta se encuentra descrita en la figura 3.3.



**Figura 3.3** Metodología general para realizar la extracción de los lixiviados de suelo (jales mineros) de acuerdo con la NOM-141-SEMARNAT-2003

### 3.4. Metodología para la extracción del mucílago de nopal

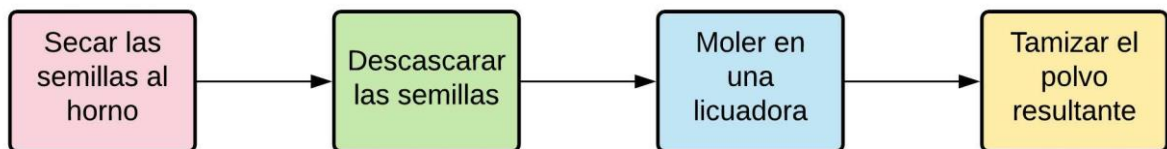
La metodología para la extracción de mucílago de nopal en polvo se presenta en la figura 3.4 tomada de Ochoa (2021).



**Figura 3.4** Metodología de extracción de mucílago de nopal (Ochoa, 2021)

### 3.5. Metodología para la extracción de la *Moringa oleifera*

La metodología para la extracción de *Moringa oleifera* se presenta en la figura 3.5 modificada de Pritchard *et al.* (2010).



**Figura 3.5** Metodología de extracción de *Moringa oleifera* (Modificado de Pritchard *et al.*, 2010).

## 4. RESULTADOS Y SU EVALUACIÓN

### 4.1. Caracterización del suelo

Las muestras de suelo utilizadas para la realización de experimentos y caracterización de riesgo se tomaron del trabajo de tesis de Huerta (2020), las concentraciones de mercurio, así como las coordenadas del sitio se muestran en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1.** Caracterización de los suelos

Clave	Coordenada Norte	Coordenada Oeste	Hg [mg/kg]
<b>Mina Soledad</b>			
01_EXPSOL1	21°9.522'	-99°40.662'	55.061
02_EXPSOL1	21°9.545'	-99°40.673'	88.044
03_EXPSOL1	21°9.564'	-99°40.681'	24.332
04_EXPSOL1	21°9.648'	-99°40.677'	40.177
05_EXPSOL1	21°9.757'	-99°40.600'	49.984
06_EXPSOL1	21°9.732'	-99°40.609'	399.514
07_EXPSOL1	21°9.721'	-99°40.621'	434.291
08_EXPSOL1	21°9.711'	-99°40.625'	608.64
09_EXPSOL1	21°9.714'	-99°40.616'	612.452
10_EXPSOL1	21°9.712'	-99°40.616'	470.784
11_EXPSOL1	21°9.709'	-99°40.607'	682.179
12_EXPSOL1	21°9.708'	-99°40.609'	479.411
13_EXPSOL1	21°9.713'	-99°40.605'	500.641
14_EXPSOL1	21°9.709'	-99°40.612'	665.518
15_EXPSOL1	21°9.708'	-99°40.615'	865.833
16_EXPSOL1	21°9.709'	-99°40.617'	834.033
01_EXPSOL2	21°9.711'	-99°40.625'	1976.77
02_EXPSOL2	21.16203°	-99.676954°	1112.455
03_EXPSOL2	21.16176°	-99.676914°	13472.581
<b>Mina Camargo</b>			
01_EXPCAM	21°6.139'	-99°43.235'	577.477
02_EXPCAM	21°6.162'	-99°43.241'	418.921
03_EXPCAM	21°6.186'	-99°43.241'	185.984
04_EXPCAM	21°6.285'	-99°43.225'	135.722
05_EXPCAM	21°6.402'	-99°43.205'	851.52
06_EXPCAM	21°6.412'	-99°43.154'	895.091
07_EXPCAM	21°6.425'	-99°43.154'	2033.147
08_EXPCAM	21°6.434'	-99°43.144'	267.629
09_EXPCAM	21°6.477'	-99°43.164'	686.076
10_EXPCAM	21°6.486'	-99°43.186'	303.693
<b>Puerta del Cielo</b>			
01_FONCIE	21°07'07.8"	-99°37'38.7"	8.702
03_FONCIE	21°07'06.0"	-99°37'38.2"	16.507
05_FONCIE	21°07'06.7"	-99°37'40.8"	5.498
06_FONCIE	21°07'04.6"	-99°37'41.2"	14.372
07_FONCIE	21°07'04.1"	-99°37'40.8"	2.107
08_FONCIE	21°07'06.6"	-99°37'41.2"	2.822
01_FONCIE2	21°7.103'	-99°37.639'	55.061

#### **4.2. Caracterización del lixiviado de suelo**

La caracterización del lixiviado de suelo contaminado con mercurio se realizó en un estudio previo por Zenil (2022) y en el laboratorio del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT). La muestra fue caracterizada siguiendo la metodología y los criterios de la NOM-141-SEMARNAT-2003. La concentración inicial de mercurio fue de 0.008 mg/L, con un pH de 7.09.

#### **4.3. Caracterización del agua sintética**

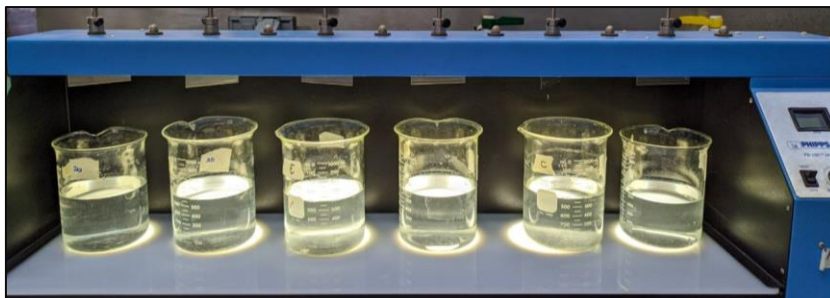
Para realizar la primera fase de los experimentos con prueba de jarras, se utilizó agua sintética la cual se obtuvo utilizando agua destilada y sulfato de mercurio ( $\text{HgSO}_4$ ), esto se preparó a una concentración de 1 mg/L. Para generar turbidez (18 UNT) se utilizó hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) a una concentración de 50 mg/L que además ayudó a incrementar el pH del agua (10.1) lo cual de acuerdo con la literatura puede aumentar el proceso de remoción de turbiedad sobre todo cuando se utiliza coagulantes naturales.

Para la segunda fase de los experimentos se utilizó agua sintética preparada con agua destilada y caolín, esto con el fin de generar una turbidez de 400 UNT, ya que se simuló la misma turbiedad obtenida del lixiviado de mercurio. En este caso el pH registrado fue de 7.66.

#### **4.4. Prueba de jarras con agua sintética primera etapa**

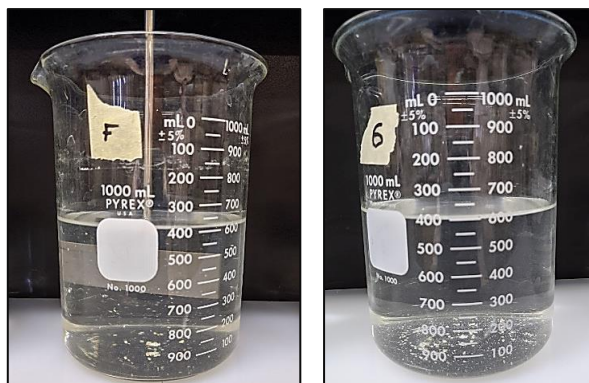
En esta etapa se realizaron los experimentos de prueba de jarras con agua sintética, esto con el fin de conocer la mejor dosis de remoción y realizar la comparación entre las eficiencias de remoción de los coagulantes naturales y coagulantes comerciales. En todos los experimentos se probaron las dosis de 10, 20, 30, 40, 50, y 60 mg/L de coagulante, se realizaron tres repeticiones por cada dosis y se utilizaron las condiciones propuestas por la ASTM-D2035 para la realización de las pruebas de jarras.

En la figura 4.1 se observa una fotografía tomada durante el experimento, la cual representa la distribución de los tratamientos, así como el probador de jarras.



**Figura 4.1** Prueba de jarras en la primera etapa de los experimentos

Durante los experimentos se notó una diferencia visual significativa entre los flóculos formados entre los diferentes coagulantes, en especial los del cloruro férrico y los de la *Moringa oleifera* (Figura 4.2 y 4.3). Esto debido a que el coagulante comercial presenta flóculos más grandes y bien formados con respecto al coagulante natural.



**Figura 4.2** Evidencia de flóculos con el coagulante natural Moringa



**Figura 4.3** Flóculos formados con el coagulante comercial cloruro férrico



#### 4.4.1. Interacción entre tipo de coagulante y dosis en agua sintética (a)

Con el fin de determinar el mejor coagulante con la mejor dosis de remoción de turbiedad se realizó un análisis de varianza del modelo representado en la ecuación 1 (apartado 3.1.4), que se muestra en la tabla 4.7, con el programa R. En este caso se evalúa la interacción entre el tipo de coagulante y la dosis, sin embargo, debido a que el *p value* de la interacción coagulante y dosis es mayor al 5% no se rechaza la hipótesis nula en la que no existe un efecto de interacción entre ambos. Por lo cual, se analizaron los factores por separado. Para el caso del factor dosis el *p value* es mayor al 5%, por lo que no hay efecto diferente entre las dosis. Mientras que para el caso del factor coagulante el *p value* es menor a 0.05, esto indica existe por lo menos un coagulante que si tiene efecto diferente sobre la variable de respuesta, es decir, por lo menos algún coagulante hace diferencia entre la remoción de turbiedad.

**Tabla 4.2** Resultados de ANOVA interacción entre coagulante y dosis (a)

Análisis de varianza					
	Df	Sum sq	Mean sq	F value	Pr(>F)
Coagulante	3	15402.4	5134.1	133.7869	$2 \times 10^{-16}$
Dosis	5	102.6	20.5	0.5350	0.7487
Coagulante: Dosis	15	541.4	36.1	0.9405	0.5283
Residuales	48	1842.0	38.4		

Con el propósito de conocer cuál es el mejor coagulante se realizó la comparación de tratamientos mediante Tukey (Tabla 4.3).

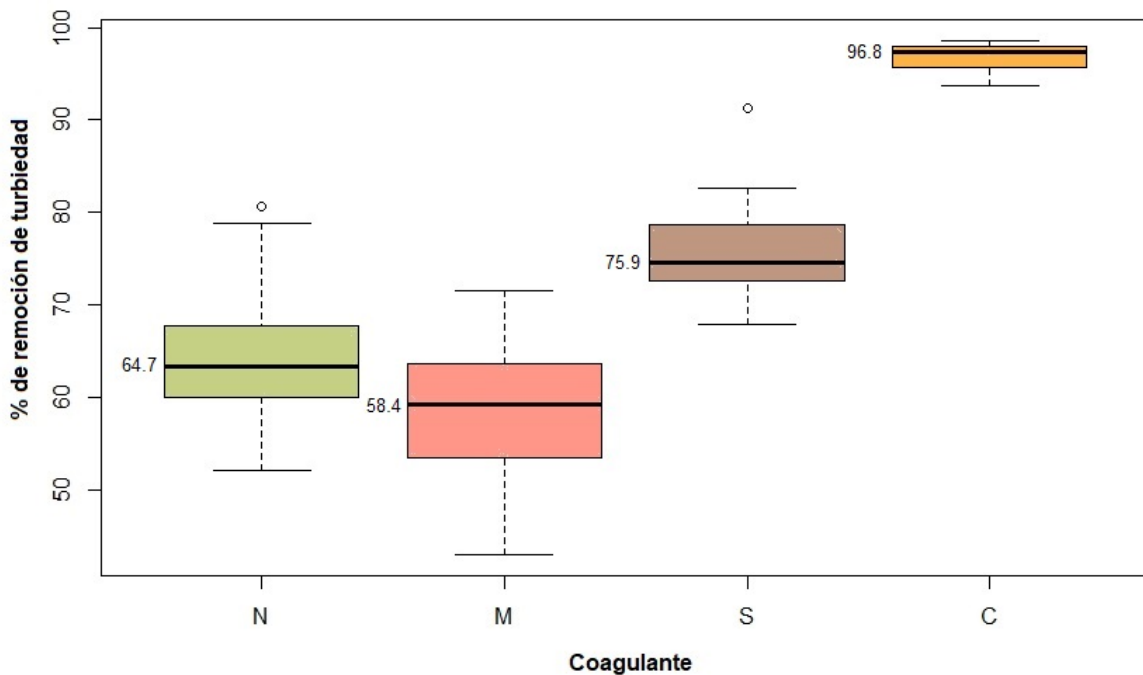


**Tabla 4.3** Comparaciones de tratamientos por pares mediante Tukey para coagulantes

Coagulante	Media de %de remoción	Comparación entre tratamientos			
Cloruro férrico	96.8	A			
Sulfato de aluminio	75.9		B		
Nopal	64.7			C	
<i>Moringa oleifera</i>	58.4				D

De la tabla 4.3 se deduce que los cuatro coagulantes tienen efectos significativamente diferentes entre ellos. Se observa que el coagulante comercial cloruro férrico es más efectivo que los otros tres coagulantes ya que tiene un promedio más grande y es estadísticamente diferente a los otros coagulantes. Sin embargo, a pesar de la alta eficiencia de remoción que tiene este coagulante comercial respecto a los demás, tiene la desventaja de aportar color al medio, por lo que para futuras decisiones ambientales es importante considerarlo.

En la figura 4.4 se muestra un diagrama de caja de los cuatro coagulantes considerando los porcentajes de remoción de las tres repeticiones de todas las dosis.



**Figura 4.4** Diagrama de caja de los coagulantes

#### 4.5. Prueba de jarras segunda etapa

En esta segunda etapa se realizaron los experimentos de prueba de jarras con agua sintética preparada con caolín. Se decidió realizar un segundo proceso de experimentación debido a que en la primera etapa ninguna de las dosis probadas para los diferentes coagulantes resultó estadísticamente significativa. Debido a esto se propusieron nuevas dosis, se utilizó un intervalo más amplio, con el fin de conocer la mejor dosis de remoción y realizar la comparación entre las eficiencias de remoción de los coagulantes naturales y coagulantes comerciales.

Para estos experimentos se probaron las dosis de 50, 200, 500, 1000, 2000, y 5000 mg/L de coagulante, se realizaron tres repeticiones por cada dosis y se utilizaron las condiciones propuestas por la ASTM-D2035 para la realización de las pruebas de jarras.

##### 4.5.1. Interacción entre tipo de coagulante y dosis en agua sintética (b)

Para evaluar la interacción entre el tipo de coagulante y dosis se realizó un análisis de varianza que se muestra en la tabla 4.4. Debido a que el *p value* de la interacción coagulante y dosis es menor al 0.05 se rechaza la hipótesis nula, lo cual indica que si existen diferencias significativas estadísticamente y por lo tanto si existe una interacción entre ambos factores.

**Tabla 4.4** Resultados de ANOVA interacción entre coagulante y dosis (b)

Análisis de varianza					
	Df	Sum sq	Mean sq	F value	Pr(>F)
Coagulante	3	31723	10574.3	220.3982	-2.2e16
Dosis	5	525	105.0	2.1895	0.070805
Coagulante: Dosis	15	2037	135.8	2.8303	0.003182
Residuales	48	2303	48		

Con el fin de evaluar el efecto de interacción entre el coagulante y la dosis, se realizó la comparación de tratamientos mediante Tukey para cada coagulante con las dosis probadas.

En el caso del mucílago de nopal, todas las dosis probadas resultaron estadísticamente iguales, como se muestra en la Tabla 4.5. Además de ser el coagulante con menor eficiencia de remoción de turbiedad con respecto a los demás coagulantes. Una de las observaciones más importantes durante el experimento fue la hidratación y aglomeramiento del mucílago de nopal casi instantánea al entrar en contacto con el agua, por lo que se infiere que este comportamiento puede tener efectos negativos en el proceso de remoción de turbiedad, ya que al aglomerarse de esta manera no interactúa con el medio y por consiguiente el proceso de coagulación-floculación resulta incompleto. En este caso se sugiere probar otros productos del mucilago de nopal, es decir en su forma líquida o revisar en la literatura otras técnicas que mejoren el extracto de este coagulante.

**Tabla 4.5** Comparaciones de tratamientos por pares mediante Tukey para nopal

Dosis (mg/L)	Media de %de remoción	Comparación entre tratamientos
50	52.25	A
1000	47.83	A
200	46.08	A
500	45.91	A
5000	42.75	A
2000	42.25	A

En la Tabla 4.6 se observa la comparación de tratamientos mediante Tukey para la *Moringa oleifera*, de donde se obtiene que para el caso de este coagulante natural las dosis de 200 y 5000 mg/L son estadísticamente diferentes, así como la dosis de 200 y 2000 mg/L. Por lo que, todas las dosis, excepto la de 200 mg/L, son las más efectivas ya que son estadísticamente iguales.

**Tabla 4.6** Comparaciones de tratamientos por pares mediante Tukey para *Moringa oleifera*

Dosis (mg/L)	Media de %de remoción	Comparación entre tratamientos
5000	96.66	A
2000	92.99	A B
1000	84.75	A B C
500	77.26	A B C D
50	75.78	A B C D E
200	69.83	C D E

Para el caso de los coagulantes comerciales (sulfato de aluminio y cloruro férrico), las comparaciones mediante Tukey se muestran en la Tabla 4.7 y 4.8. Donde se hace notar que, para ambos coagulantes, las dosis probadas son estadísticamente iguales.

**Tabla 4.7** Comparaciones de tratamientos por pares mediante Tukey para sulfato de aluminio

Dosis (mg/L)	Media de %de remoción	Comparación entre tratamientos
2000	95.85	A
1000	95.22	A
5000	94.88	A
500	93.95	A
200	90.08	A
50	87.80	A

**Tabla 4.8** Comparaciones de tratamientos por pares mediante Tukey para cloruro férrico

Dosis (mg/L)	Media de %de remoción	Comparación entre tratamientos
50	58.16	A
5000	48.41	A
200	45.66	A
2000	43.58	A
500	42	A
1000	40.75	A

#### 4.6 Prueba de jarras utilizando lixiviado de suelo

Derivado de las pruebas en agua sintética y en seguimiento a uno de los objetivos específicos, en esta etapa final de experimentación se aplicó la mejor dosis de remoción de turbiedad para los coagulantes naturales y comerciales. En este caso solo se seleccionó la *Moringa oleifera* y el sulfato de aluminio, debido a que tuvieron porcentajes de remoción más altos, no presentaron cambios significativos en el color del agua y la manipulación de ellos en los experimentos fue más práctica con respecto a los demás coagulantes.

Para el caso de la *Moringa oleifera* todas las dosis, excepto la de 200 mg/L resultaron estadísticamente iguales y efectivas, esto de acuerdo al análisis de Tukey realizado anteriormente. Mientras que, para el sulfato de aluminio, todas las dosis probadas resultaron estadísticamente iguales por lo que para ambos casos se trabajó con la dosis de 5000 mg/L con el fin de comparar las eficiencias de remoción de ambos coagulantes.

Las pruebas finales también se efectuaron con agua sintética con el fin de realizar una comparación entre los porcentajes de remoción de turbiedad y mercurio en este medio y en el extracto de suelo (lixiviado).

Para realizar los experimentos se utilizó un probador de jarras, el lixiviado de suelo contaminado con mercurio y el agua sintética utilizada en la segunda etapa de experimentación; de esta experimentación se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.15. Cabe resaltar que en esta etapa no se utilizó modelo estadístico, solo se realizó una prueba, con una muestra para cada caso y no se realizaron repeticiones.

**Tabla 4.15** Resultados de la prueba de jarras con el lixiviado de suelo

<b>Agua sintética</b>		
Turbiedad inicial en UTN	Sulfato de Aluminio	<i>Moringa oleifera</i>
	Turbiedad final en UTN	
400	21.3	35.3
	Porcentaje de remoción de turbiedad (%)	
	94.675	91.175
pH inicial	pH final	
6.06	3.43	6.25
Concentración de mercurio inicial en mg/L	<b>Concentración de mercurio final en mg/L</b>	
1	0.365881	0.008583
	<b>Porcentaje de remoción de mercurio (%)</b>	
	<b>63.4119</b>	<b>99.1417</b>
<b>Lixiviado de suelo</b>		
Turbiedad inicial en UTN	Sulfato de Aluminio	<i>Moringa oleifera</i>
	Turbiedad final en UTN	
300	15.6	15.5
	Porcentaje de remoción de turbiedad (%)	
	94.8	94.83333333
pH inicial	pH final	
6.35	3.64	5.24
Concentración de mercurio inicial en mg/L	<b>Concentración de mercurio final en mg/L</b>	
0.008	0.003936	0.007872
	<b>Porcentaje de remoción de mercurio (%)</b>	
	<b>50.8</b>	<b>1.6</b>

De la tabla 4.15 se observa que en el caso del agua sintética el porcentaje de remoción de turbiedad fue de 94% con el coagulante comercial de sulfato de aluminio, mientras que con el coagulante natural de *Moringa oleifera* el porcentaje de remoción de este parámetro fue de 91%, esto con una turbiedad inicial de 400 UTN para ambos casos. De esto se puede resaltar que la diferencia entre ambos coagulantes es mínima, sin embargo, el coagulante natural no

altera el pH del sistema. Para el caso de la remoción de mercurio en el agua sintética la *Moringa oleifera* presentó mejor porcentaje de remoción de este contaminante con respecto al coagulante comercial, con una eficiencia del 99%, esto a partir de una concentración inicial de 1 mg/L de mercurio en el agua. Mientras que el sulfato de aluminio presentó un porcentaje de remoción de mercurio del 63%.

Con respecto a los experimentos con el lixiviado de suelo, en la tabla 4.15 se reflejan los resultados obtenidos, de donde se observa que los dos coagulantes tanto el natural como el comercial presentan el 94% de remoción de turbiedad, sin embargo, el coagulante comercial disminuye en una proporción del 50% su valor original de pH, mientras que el coagulante natural solo lo disminuye en una unidad. En relación con la remoción de mercurio, el sulfato de aluminio presentó un mayor porcentaje de eficiencia con respecto a la *Moringa oleifera*, ya que su porcentaje de remoción fue de 50% mientras que para el coagulante natural fue del 1.6%.

Nótese que existe una diferencia entre el porcentaje de remoción de mercurio en el agua sintética y en el lixiviado de suelo, esto puede explicarse debido a que en el primer caso el agua no contiene otros iones que puedan interferir en el proceso de remoción aunado a que en este caso la concentración de mercurio es considerablemente más alta que en el extracto de suelo. Por lo que se recomienda realizar estudios más específicos y experimentos más detallados con el lixiviado de suelo con el fin de conocer los aspectos químicos y físicos que interfieren en el proceso de remoción.

## 5. ANÁLISIS DE RIESGO

### 5.1 Análisis de riesgo ecológico

El análisis de riesgo ecológico se realizó para los tres sitios dentro del estado de Querétaro, correspondientes a dos sitios mineros y un sitio alejado de la zona minera. Para realizar el análisis se utilizó el módulo de riesgo ecológico que se encuentra dentro del paquete computacional SADA. Este software proporciona valores de referencia ecológicos tomados de diferentes referencias y estudios, dentro de los cuales se encuentran: el programa de nivel de detección de suelo ecológico de la USEPA, niveles de detección de las regiones 4, 5 y 6 de la USEPA, valores de invertebrados, microbios y plantas del Laboratorio Nacional de Oak Ridge y niveles de objetivo e intervención holandeses.

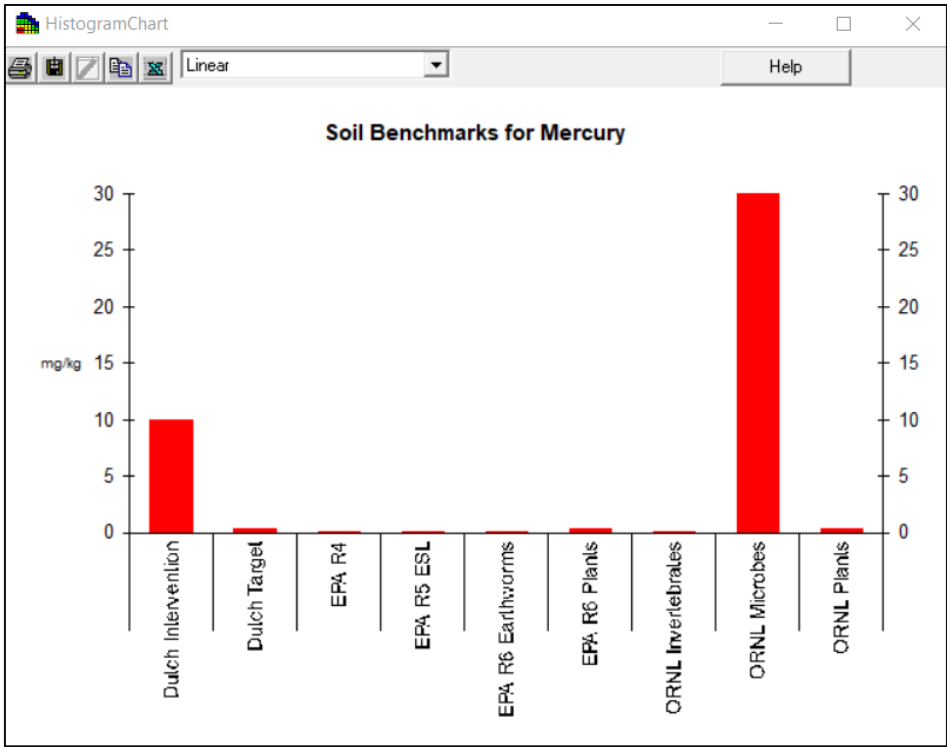
Los puntos o valores de referencia ecológicos son concentraciones de efectos ambientales derivados de diferentes pruebas de toxicidad, las cuales son simuladas o extrapoladas de otros puntos de referencia o de simulaciones de un punto final de evaluación (SADA, 2021).

Es importante mencionar que, aunque la base de datos de referencia del software incluye 426 especies, compuestos y elementos químicos, no todas las fuentes tienen valores para cada elemento en la base de datos, tal es el caso del mercurio, para el cual solo existen valores de referencia en las bases de datos mostradas en la figura 5.1. En esta imagen se muestra la concentración de referencia de mercurio en el suelo, por lo que el software analiza las concentraciones de este elemento en las muestras de la zona de estudio y realiza la comparación con respecto a los valores de referencia, dado este procedimiento define si los valores de mercurio en las muestras representan un riesgo ecológico en la zona con respecto a la base de datos. Sin embargo, para tener un panorama más amplio sobre la magnitud en la que las concentraciones se exceden, el software realiza un cálculo a través de una relación entre los valores de la base de datos y las concentraciones de las muestras, en este caso si la relación es mayor a 1 se indica que la concentración superó el valor de referencia y por lo



tanto representa un riesgo ecológico, en caso contrario si el resultado es menor a uno se indica que la concentración se encuentra por debajo de la referencia y por lo tanto no representa un riesgo ecológico. De esta manera valores muy por encima de uno, representarían un riesgo ecológico muy alto.

Para la realización de todos los cálculos dentro del software se tomó en cuenta el UCL95, el cual tiene como límite superior de confianza del 95% en la concentración media de una distribución normal y es el valor recomendado por la USEPA (2014).

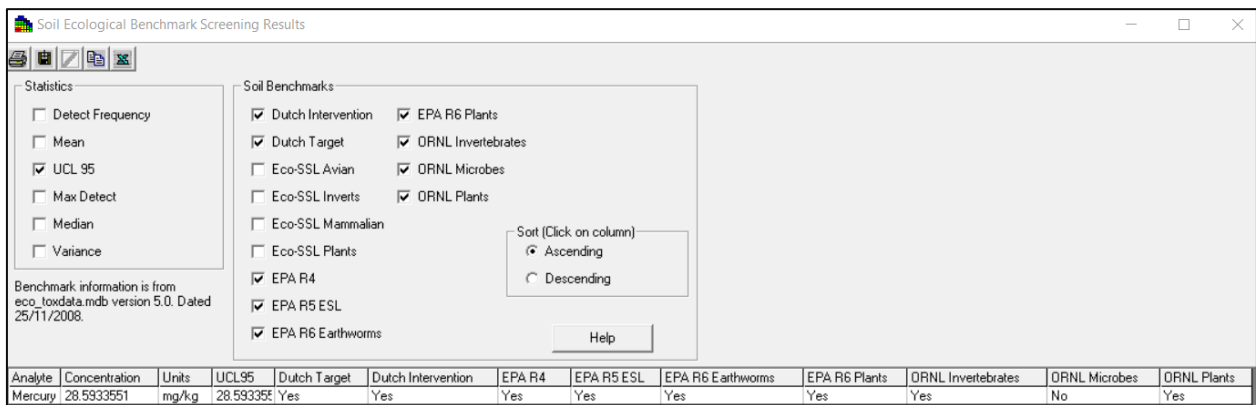


Benchmark	Value
Dutch Intervention	10
Dutch Target	0.3
EPA R4	0.1
EPA R5 ESL	0.1
EPA R6 Earthworms	0.1
EPA R6 Plants	0.3
ORNL Invertebrates	0.1
ORNL Microbes	30
ORNL Plants	0.3

**Figura 5.1** Valores de referencia ecológicos para el mercurio

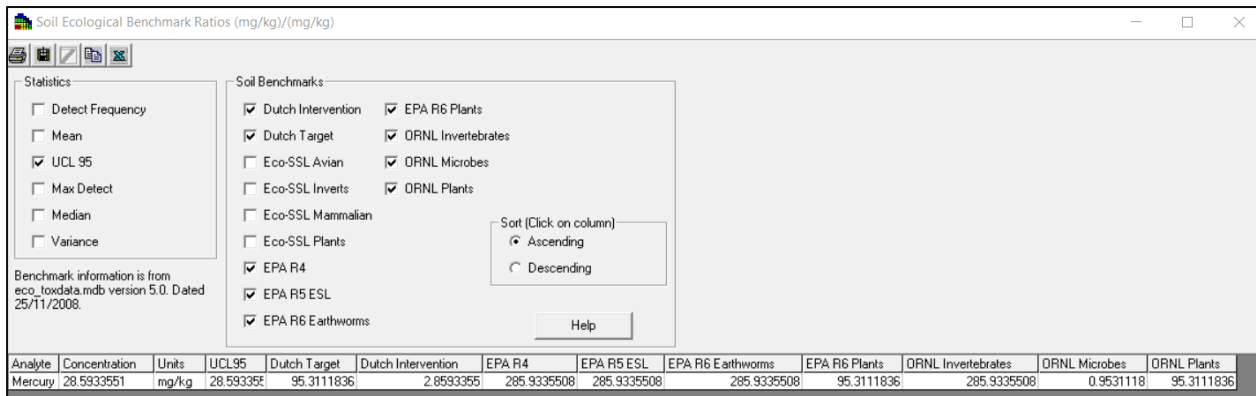
### 5.1.1 Puerta del cielo

Este sitio presenta concentraciones de mercurio inferiores respecto a los dos sitios mineros, esto debido a que se encuentra alejado de las zonas de explotación de mercurio. En la figura 5.2 se observan los resultados del análisis de riesgo ecológico para este sitio, de donde se aprecia que, para todos los casos, excepto para los microbios, la concentración de este elemento en el suelo, resulta un riesgo ecológico, es decir supera los valores de referencia.



**Figura 5.2** Resultados de riesgo ecológico en Puerta del Cielo

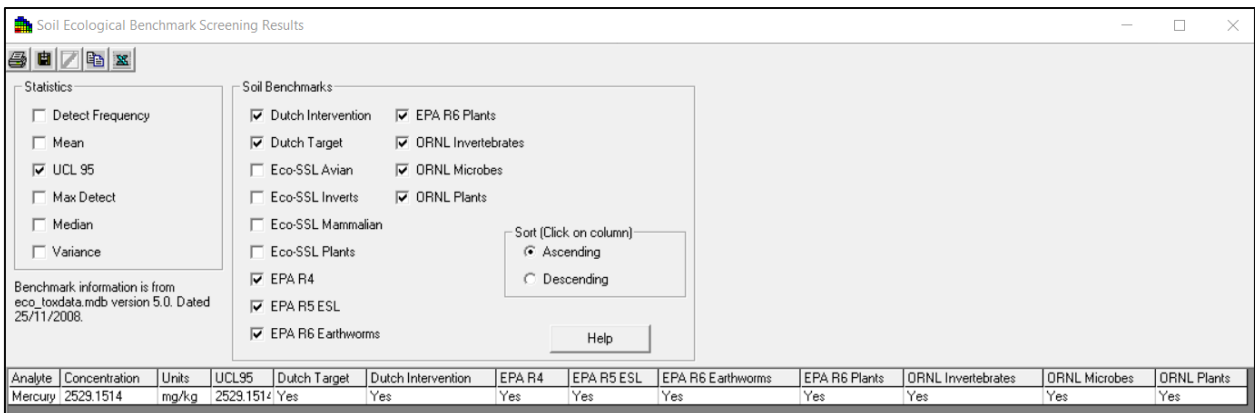
Con el fin de conocer la magnitud en que las concentraciones del contaminante exceden los valores de referencia, se calcularon las relaciones entre la concentración de mercurio en la muestra y los valores de las bases de datos, de esto se obtienen las relaciones mostradas en la figura 5.3. Nótese que el cociente de la relación para la base de datos de microbios es la única que presenta un valor menor a uno, sin embargo, el valor resultante es de 0.95 lo cual está muy cercano al valor límite, por lo cual se recomienda realizar un estudio más detallado o ingresar otra base de datos para estos organismos. En el caso de las demás relaciones, se observa que exceden en ordenes de más de 200 veces el cociente de concentraciones, por lo que la magnitud del riesgo ecológico es muy alta, en este caso se recomienda realizar una evaluación más detallada de las especies de la zona con el fin de definir aquellas que se encuentran en situación vulnerable debido a la concentración de mercurio en el suelo.



**Figura 5.3** Resultados de riesgo ecológico en Puerta del Cielo (cociente de concentraciones)

### 5.1.2 Mina Soledad

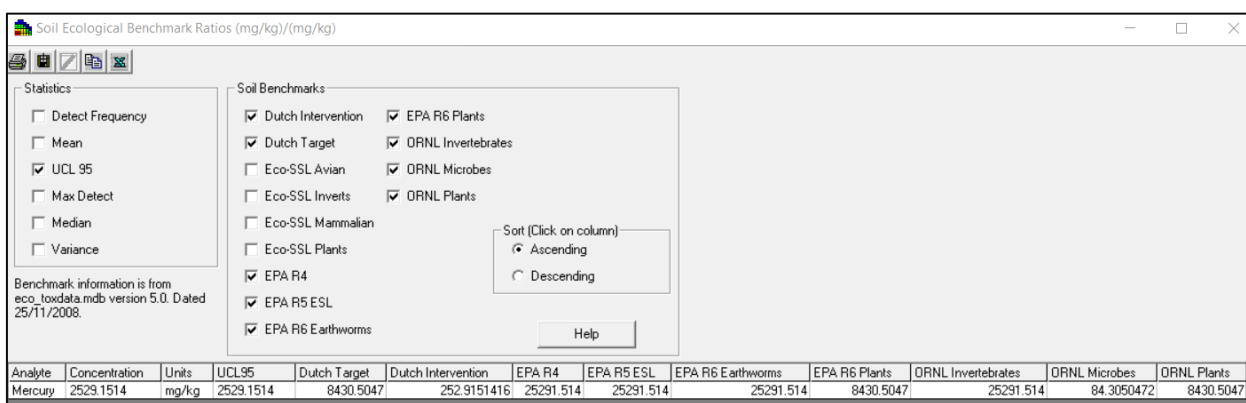
Esta zona presenta concentraciones de mercurio muy elevadas, siendo el valor de 13 mil mg/kg el más alto, esto derivado de ser un sitio de explotación de mercurio de manera artesanal. Los resultados del análisis de riesgo ecológico se presentan en la figura 5.4, de lo cual se observa que, para todas las bases de datos, la concentración de mercurio en el suelo en la mina representa un riesgo ecológico para las especies de flora y fauna.



**Figura 5.4** Resultados de riesgo ecológico en Mina Soledad

La figura 5.5 muestra los resultados del análisis de riesgo ecológico con respecto al cociente de concentraciones, en este caso se resalta que las concentraciones de mercurio superan los niveles de referencia en ordenes de magnitud muy altas, ya que los resultados de estos

cocientes, varían de dos mil a 25 mil, excepto para los microbios que tienen un cociente de 84. Derivado de lo anterior, se infiere que debido a que este sitio es una zona de explotación de mercurio, la flora y fauna que se encuentre en el sitio puede ser escasa debido a la actividad antropogénica y a las altas concentraciones de mercurio que pueden terminar con los organismos vivos del lugar. Sin embargo, se recomienda realizar un estudio de riesgo ecológico en las zonas cercanas a la mina con el fin de evaluar los efectos del mercurio en las especies en áreas circundantes.

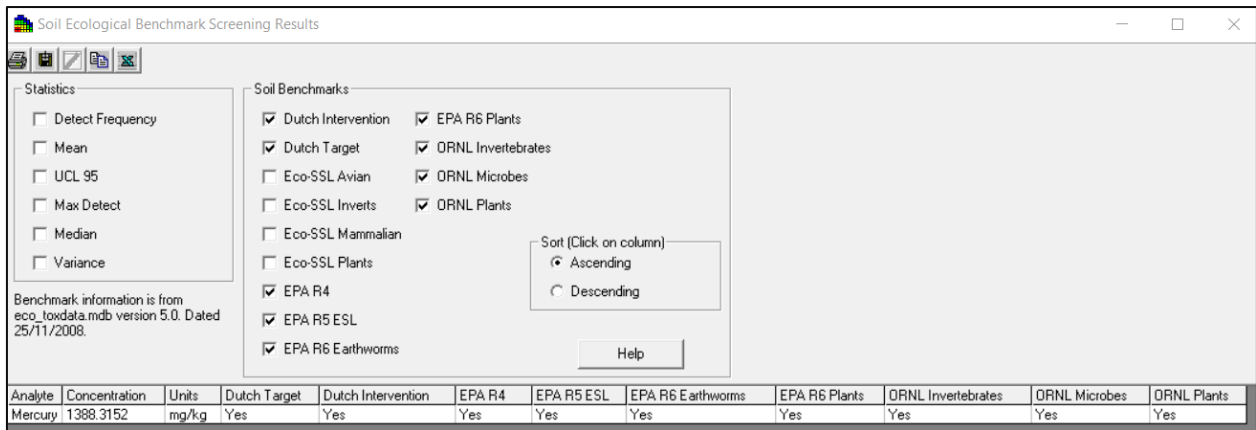


**Figura 5.5** Resultados de riesgo ecológico en Mina Soledad (cociente de concentraciones)

### 5.1.3 Mina Camargo

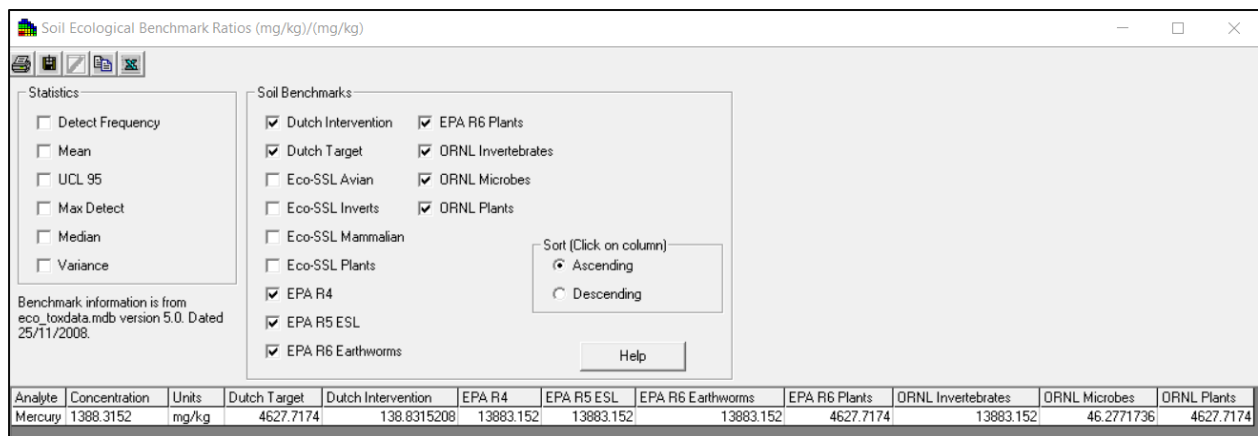
La Mina Camargo es un sitio de explotación de mercurio, las concentraciones de este elemento en suelo varían de 100 a 2000 mg/kg, por lo que se encuentran por arriba de los valores encontrados en Puerta del Cielo (sitio alejado del proceso de explotación).

Los resultados del proceso de evaluación de riesgo ecológico se presentan en la figura 5.6, nótese que al igual que la Mina Soledad, las concentraciones de mercurio en el suelo representan un riesgo ecológico para la zona en todas las bases de datos, por lo que las especies de flora y fauna se encuentran expuestas a niveles de mercurio no seguros para su supervivencia.



**Figura 5.6** Resultados de riesgo ecológico en Mina Camargo

La figura 5.7 muestra los resultados de riesgo ecológico en la Mina Camargo, con respecto a los cocientes de concentraciones, de esto se nota que las concentraciones de mercurio en las muestras de suelo en este sitio superan los valores de referencia para todas las bases de datos del software, en magnitudes significativamente altas, esto se puede observar ya que los cocientes para algunas bases de datos superan 13 mil veces el valor seguro de 1, por lo que existe un riesgo ecológico significativamente alto para las especies en la zona.



**Figura 5.7** Resultados de riesgo ecológico en Mina Camargo (cociente de concentraciones)

## 5.2 Análisis de riesgo a la salud

En esta etapa se realizó el análisis de riesgo a la salud de tres sitios diferentes dentro del estado de Querétaro. El primer sitio está localizado en Puerta de Cielo y se encuentra alejado de los sitios de explotación de mercurio. Esta zona fue clasificada como suelo de tipo residencial ya que en el área se encuentran cabañas de habitantes de la población. El segundo sitio se localiza en la mina Soledad, que se encuentra en la localidad de San Gaspar. Este sitio fue clasificado como suelo de tipo industrial ya que los puntos se tomaron dentro de la zona de explotación de mercurio. Por último, el tercer sitio se ubica en la mina Camargo, en la comunidad con el mismo nombre. Esta zona se clasificó como suelo de uso industrial ya que el área es utilizada para realizar trabajo de minería de mercurio.

Para cada uno de los sitios se realizó la evaluación de riesgo a la salud y en todos los casos se tomaron los mismos parámetros y las mismas condiciones de trabajo, a excepción del uso de suelo que para un sitio fue diferente a los demás. Se definió como contaminante el cinabrio (HgS) debido a que la zona tiene importantes yacimientos de este mineral el cual es la mena principal de mercurio (SGM, 2019). Debido a que este compuesto es clasificado como no cancerígeno de acuerdo con el software SADA, se definió el Índice de Peligro con valor en 1 y para la realización de los cálculos se tomó en cuenta el UCL95, el cual tiene como límite superior de confianza del 95% en la concentración media de una distribución normal y es el valor recomendado por la USEPA (2014).

Los parámetros de exposición utilizados para los cálculos, así como los datos fisicoquímicos y toxicológicos del sulfuro de mercurio se muestran en la figura 5.8 y 5.9. Estos datos se encuentran cargados previamente en el software y son tomados de los valores oficiales de la USEPA. En el caso de este estudio solo se utilizaron los parámetros para uso de suelo residencial e industrial, esto debido a la naturaleza de los sitios de muestreo descrito anteriormente.

Set Human Health Exposure Parameters

Exposure Parameters - Soil

	Residential	Industrial	Recreational	Excavation	Agricultural	
Exposure frequency	350	250	40	20	350	days/yr
Adult exposure duration	24	25	24	1	24	years
Child exposure duration	6	0	6	0	6	years
Total exposure duration	30	25	30	1	30	years
Adult soil ingestion rate	100	100	100	480	100	mg/day
Child soil ingestion rate	200	0	200	0	200	mg/day
Fraction ingested	1	1	1	1	1	unitless
Inhalation rate	20	20	20	20	20	m <sup>3</sup> /day
Adult surface area	0.53	0.316	0.53	0.53	0.53	m <sup>2</sup> /day
Adherence factor	1	1	1	1	1	mg/cm <sup>2</sup>
Gamma exposure factor	1	0.3333	0.041667	0.3333	1	unitless
Gamma shielding factor	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	unitless

General

Body weight: Adult 70, Child 15 kg

Lifetime: Adult 70 years

Mass loading factors

Plant MLF: Residential 0.26, Agricultural 0.26 unitless

Pasture MLF: Residential 0.26, Agricultural 0.26 unitless

Milk food chain pathway (Dairy cattle)

Fraction on-site: Residential 1, Agricultural 1 unitless

Fraction feed from site: Residential 1, Agricultural 1 unitless

Quantity pasture ingested: Residential 16.1, Agricultural 16.1 kg/day

Quantity soil ingested: Residential 1, Agricultural 1 kg/day

Beef food chain pathway (Beef cattle)

Fraction on-site: Residential 1, Agricultural 1 unitless

Fraction feed from site: Residential 1, Agricultural 1 unitless

Quantity pasture ingested: Residential 7.2, Agricultural 7.2 kg/day

Quantity soil ingested: Residential 1, Agricultural 1 kg/day

Update Help Exit

Figura 5.8 Parámetros de exposición utilizados por el software SADA

Set Human Health Contaminant Physical Parameters

Mercuric Sulfide

General

Inorganics

CAS # = 1344485

Volatile = NO

Physical Contaminant Parameters

Soil-to-air Volatilization Factor (VF) m<sup>3</sup>/kg

Soil-to-air Particulate Emission Factor (PEF) 1320000000 m<sup>3</sup>/kg

Dermal Absorption Factor (ABS) 0.001 unitless

Permeability Constant (KP) 0.000884 cm/hr

Saturation Coefficient (CSAT) mg/kg

Half-life days

Inhalation Exposure Factor (Rad) (L-hr)/(m<sup>3</sup>-day)

Food Chain Contaminant Parameters

Soil-to-plant wet uptake (BV Wet) (mg/kg)/(mg/kg)

Soil-to-plant dry uptake (BV Dry) (mg/kg)/(mg/kg)

Milk transfer coefficient (Milk BTF) day/kg

Beef transfer coefficient (Beef BTF) day/kg

Fish bioaccumulation factor (Fish BTF) 100 L/kg

Update Help Exit

Set Human Health Contaminant Toxicity

Mercuric Sulfide

General

Inorganics

CAS # = 1344485

Volatile = NO

Noncarcinogen

Noncarcinogenic Toxicity

Oral Reference Dose: GW/SW 0.0003, SD/SD 0.0003, Diet 0.0003 (mg/kg-day)

Subchronic Oral Reference Dose (mg/kg-day)

Inhalation Reference Concentration (mg/m<sup>3</sup>)

Subchronic Inhalation Reference Concentration (mg/m<sup>3</sup>)

Dermal Reference Dose: GW/SW 0.0000009, SD/SD 0.0000009 (mg/kg-day)

Subchronic Dermal Reference Dose (mg/kg-day)

Figura 5.9 Parámetros fisicoquímicos y de toxicidad del contaminante

### 5.2.1 Puerta del cielo

Este sitio se encuentra cercano a la ciudad de Pinal de Amoles, aproximadamente a 1.5 km en línea recta. Esta zona está caracterizada por estar alejada de la zona de extracción de mercurio, por lo que la concentración de mercurio está dada de manera natural por la geología de la zona (SGM, 2019). La distribución de las concentraciones de mercurio se muestra en la figura 5.10. Nótese que dichas concentraciones son muy variadas, esto puede deberse a la heterogeneidad natural del suelo y la época del año en que se realizó el muestreo, puesto que en el caso de la muestra que presenta una concentración de 55.06 mg/kg fue tomada en época de lluvia, mientras que las demás muestras se tomaron en época de sequía. Esto puede influir en la movilización del mercurio en el medio y por lo tanto aumentar su concentración.

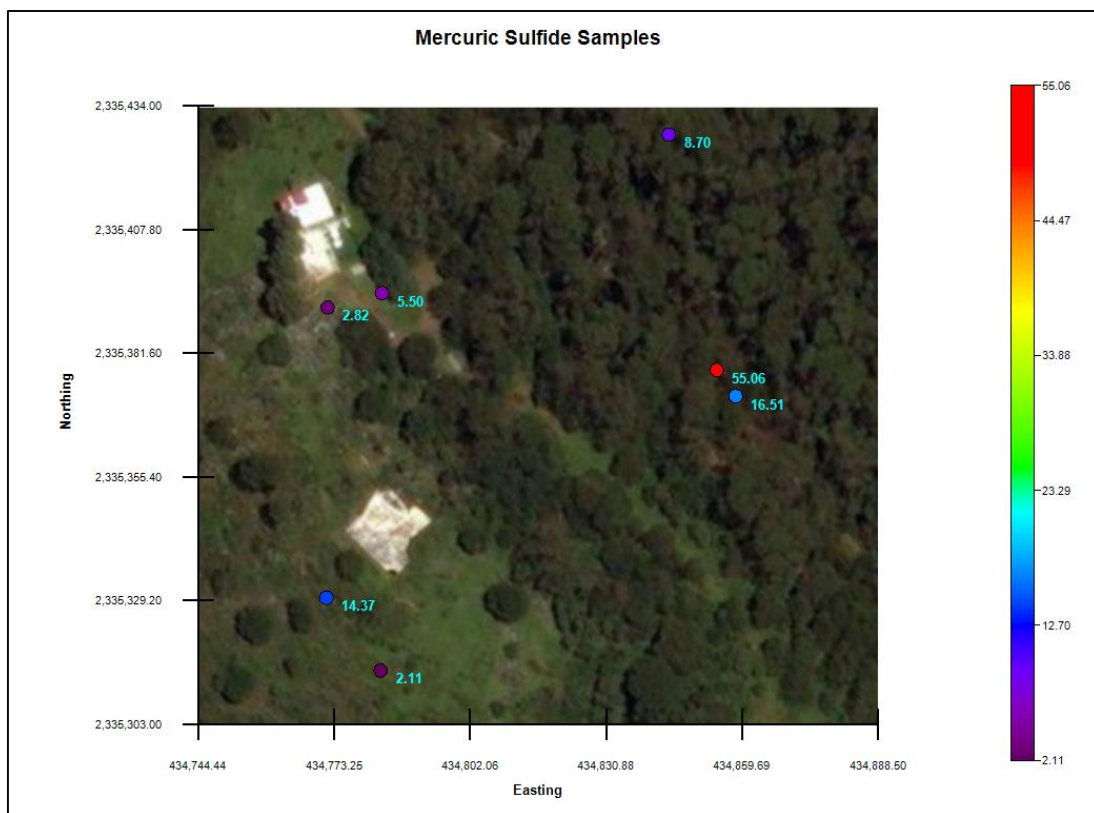
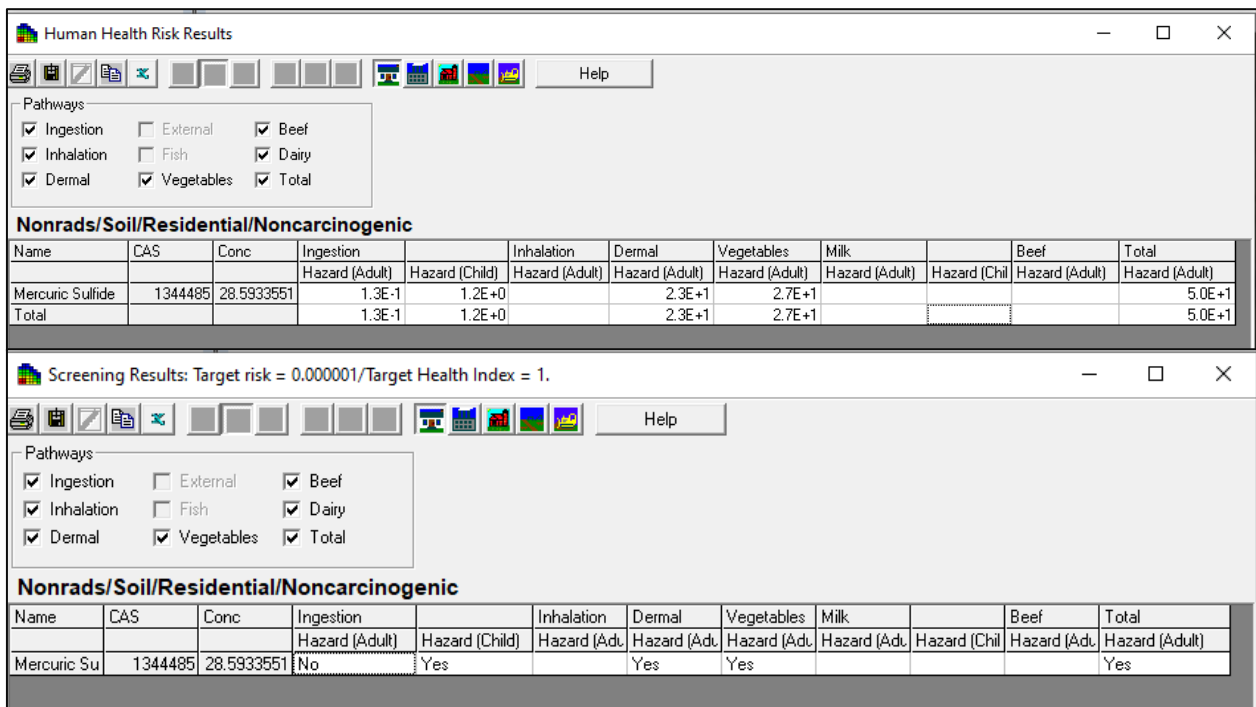


Figura 5.10 Distribución de concentración de mercurio en Puerta del Cielo



Los resultados del cálculo de riesgo a la salud de esta zona se muestran en la figura 5.11. En dicha imagen se observa que, para uso residencial, por vía de ingestión el valor del índice es mayor a uno tanto para adultos como para niños, para el caso dérmico, así como ingestión de vegetales también el riesgo es mayor a uno. Por lo tanto, la suma de los riesgos es mayor a uno, indica que la exposición a este contaminante no es segura y por lo tanto puede tener efectos adversos a la salud en las condiciones evaluadas.

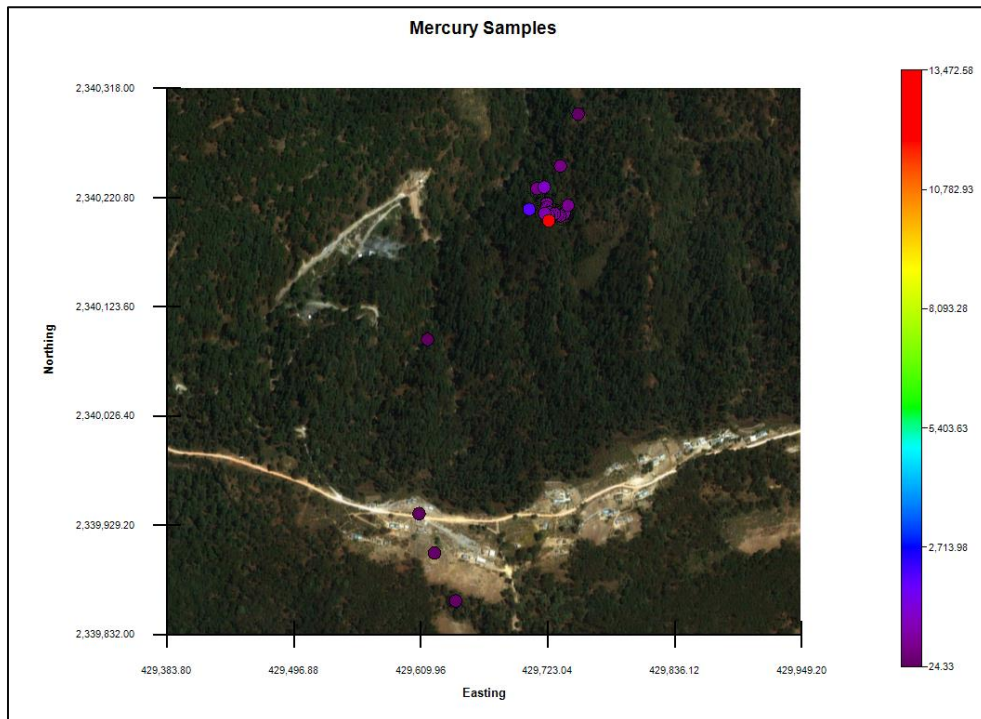


**Figura 5.11** Resultados del cálculo de riesgo Puerta del Cielo con el software SADA

### 5.2.2 Mina Soledad

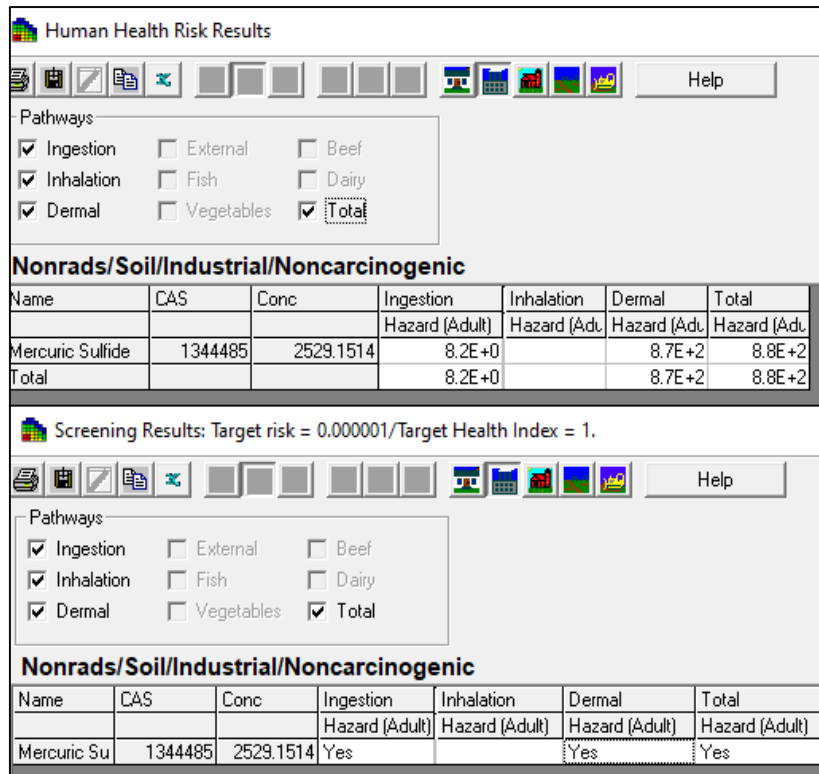
Esta zona se encuentra localizada en el municipio de Pinal de Amoles y la localidad más cercana a la mina es la comunidad de San Gaspar, aproximadamente a un km. En este sitio se realiza la extracción de mercurio de manera artesanal, por lo que el uso de suelo se definió como comercial.

La distribución de la concentración de mercurio se visualiza en la figura 5.12. La escala de colores de lado derecho muestra la concentración en mg/kg de mercurio en el suelo. Los valores con mayor concentración se encuentran cercanos al sitio de explotación del cinabrio y fueron tomados en época de lluvia donde la movilización de mercurio puede ser mayor.



**Figura 5.12** Distribución de concentración de mercurio en la mina Soledad

Los resultados del cálculo de riesgo se reflejan en la figura 5.13. Para uso de suelo industrial mediante la vía de exposición de ingestión, así como dérmica el riesgo es mayor a uno, por lo tanto, la suma de los riesgos es mayor a uno. Esto indica que la exposición de este contaminante bajo las condiciones específicas no es seguro y puede tener consecuencias graves a la salud de las personas que trabajan en la zona.

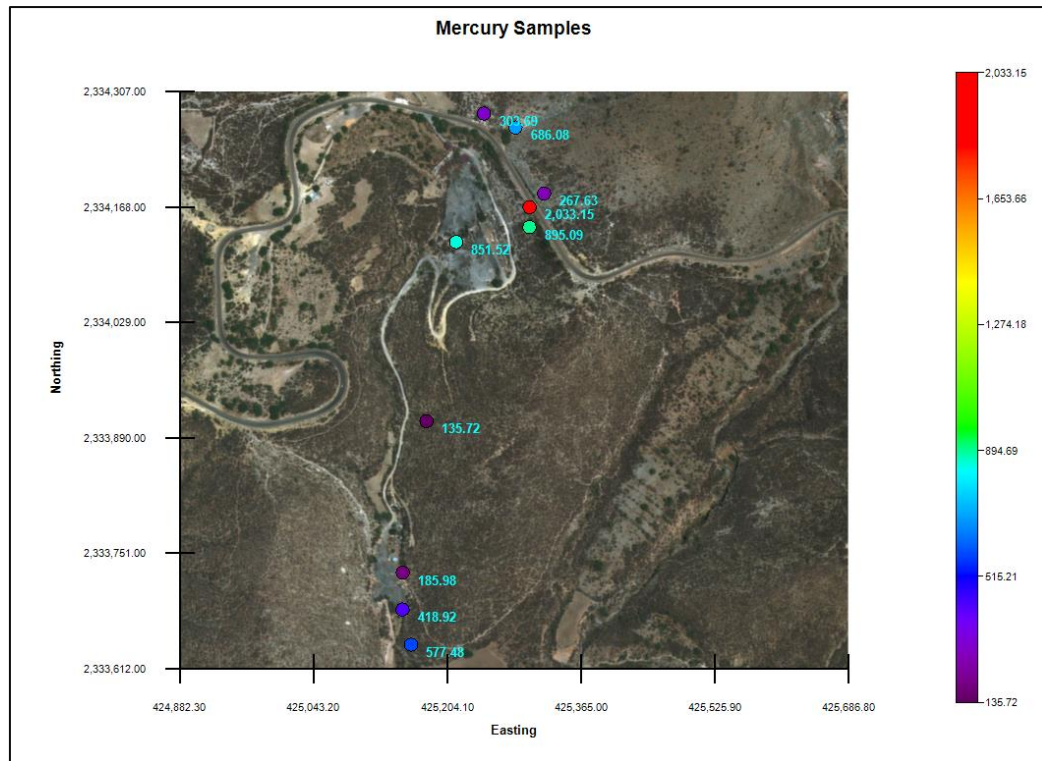


**Figura 5.13** Resultados del cálculo de riesgo mina Soledad con el software SADA

### 5.2.3 Mina Camargo

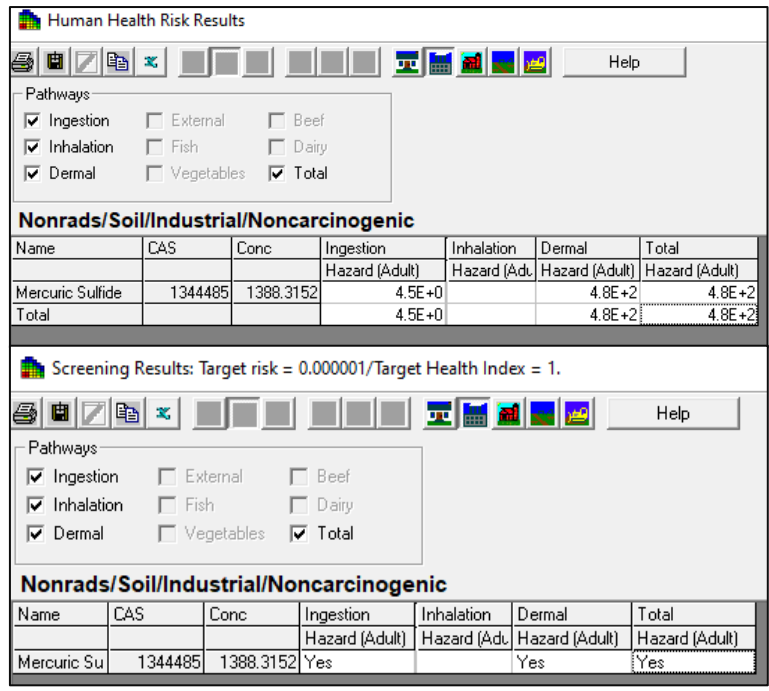
Esta zona se encuentra localizada en el municipio de Peñamiller y la localidad más cercana a la mina es la comunidad de Camargo. En esta zona al igual que la mina Soledad se realiza explotación de mercurio de manera artesanal y por lo tanto el uso de suelo se clasificó como industrial.

La distribución de las concentraciones de mercurio en el suelo se muestra en la figura 5.14. Se observa que existe variedad entre las concentraciones de mercurio en puntos de muestreo muy cercanos, esto puede deberse a la heterogeneidad del suelo. También es importante mencionar que en este sitio solo se realizó muestreo en la época de lluvia por lo que las concentraciones pueden ser mayores a la que se puede tener en época de sequía.



**Figura 5.14** Distribución de concentración de mercurio en la mina Camargo

Los resultados del cálculo de riesgo se presentan en la figura 5.15. Para este caso se trabajó con uso de suelo industrial y los resultados bajo este escenario muestran que existe riesgo a la salud por vía de ingestión, así como dérmica, ya que el valor del riesgo es mayor a uno. Por lo tanto, la suma de los riesgos es mayor a uno, lo que indica que la exposición a mercurio en la zona bajo las condiciones trabajadas puede resultar perjudicial a la salud de los trabajadores del sitio.



**Figura 5.15** Resultados del cálculo de riesgo mina Camargo con el software SADA

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los objetivos planteados en la presente tesis se puede concluir lo siguiente:

La concentración de mercurio presente en las muestras de suelo de la zona de estudio supera los valores de referencia en todas las bases de datos contenidos en el software SADA, por lo que dicha concentración representa un riesgo ecológico en el área.

Las especies de flora y fauna se encuentran expuestas a niveles de mercurio no seguros para su supervivencia.

Para el caso del análisis de riesgo a la salud se concluye que la concentración de mercurio presente en suelos del estado de Querétaro es clasificada como riesgosa, para escenario de uso residencial e industrial. Esto se realizó simulando diferentes rutas de exposición de las cuales solo ingestión, dérmica y vegetales resultaron riesgosas. Esto se modeló utilizando como contaminante el sulfuro de mercurio.

De acuerdo con el estado del arte de los coagulantes naturales, la *Moringa oleifera* es el coagulante natural más utilizado a nivel internacional debido a que presenta una alta eficiencia de remoción de turbiedad, así como de metales y otros compuestos.

- También cabe mencionar que el procedimiento de extracción para este coagulante es similar en la mayoría de las diferentes fuentes consultadas.
- La dosis de *Moringa oleifera* es función del tipo y concentración de contaminante con el que se trabaje.

La prueba de jarras se utilizó para evaluar la remoción de turbiedad como primera instancia con el fin de encontrar la mejor dosis y el mejor coagulante para posteriormente probar la remoción de mercurio. De lo primero se concluye lo siguiente:

Se concluye que no existe un efecto de interacción entre el coagulante y la dosis probada para la primera parte de los experimentos, debido a que no se rechazó la hipótesis nula. Sin embargo, si existe un efecto del factor coagulante. Es decir, si existe por lo menos un coagulante que tiene un efecto en la remoción de turbiedad. De lo anterior y de acuerdo con el análisis de Tukey se comprueba que todos los coagulantes son significativamente diferentes, por lo que debido al promedio de los porcentajes de remoción de turbiedad el mejor coagulante es el cloruro férrico (independientemente de la dosis).

Derivado de lo anterior se realizó un segundo proceso de experimentación con el fin de encontrar la mejor dosis y el mejor coagulante, donde se utilizaron los mismos coagulantes, pero dosis de 50, 200, 500, 1000, 2000 y 5000 mg/L se concluye que:

Se rechaza la hipótesis nula de no interacción por lo cual si existe un efecto de interacción entre el coagulante y la dosis. Es decir que hay efectos diferentes de las dosis en cada coagulante. En correspondencia a lo anterior, se analizó con Tukey y se determinó que:

Para el caso del mucílago de nopal, no existió una diferencia estadística significativa entre las dosis probadas, de hecho, los porcentajes de remoción de turbiedad oscilaron entre el 40 y 50% por lo que lo convierte en un coagulante no adecuado para la experimentación. El efecto de hidratación del mucílago, así como la rápida acumulación al entrar en contacto con el agua son las causas principales inferidas por las que este coagulante presenta una baja eficiencia de remoción de turbiedad.

En el caso de la *Moringa oleifera* se concluyó que, si existe una diferencia estadística en las dosis probadas, siendo la dosis de 200 mg/L la que presentó el menor porcentaje de remoción, las demás dosis fueron estadísticamente iguales, con eficiencias de más del 70%, por lo que se determina que, dentro de los dos coagulantes naturales probados, este es el más adecuado para usarse en procesos de remoción de turbiedad. Lo anterior es confirmado con la

investigación previa que se realizó en los diferentes artículos internacionales, donde se menciona que la *Moringa oleifera* es el coagulante natural más usado a nivel mundial con mayor efectividad de remoción de turbiedad y en diversos contaminantes probados.

Los experimentos con el cloruro férrico no mostraron diferencias estadísticas significativas con las dosis probadas, además de presentar una baja eficiencia en el proceso de remoción. Dicha baja eficiencia de este coagulante en esta etapa de experimentación pudo deberse a las grandes cantidades ocupadas de este coagulante en el experimento y al aporte de color del mismo al medio.

En el caso del sulfato de aluminio se concluyó que no existen diferencias significativas dentro de las dosis probadas, sin embargo, las eficiencias de remoción en todas las dosis aplicadas resultaron muy altas con más del 90% de remoción de turbiedad. Por lo que se concluye que, dentro de los dos coagulantes comerciales probados, este resulta ser más efectivo en el proceso de experimentación en cualquiera de las dosis probadas.

Como resultado del proceso de experimentación en el probador de jarras se concluyó que el mejor coagulante natural es la *Moringa oleifera* y el mejor coagulante comercial el sulfato de aluminio.

De acuerdo con el último objetivo específico planteado en este trabajo, se aplicó la mejor dosis de remoción con los mejores coagulantes al lixiviado de suelo contaminado con mercurio, de la anterior se concluye que:

El sulfato de aluminio y la *Moringa oleifera* presentan eficiencias altas de remoción de turbiedad, ambos con un porcentaje de 94%, sin embargo, el coagulante comercial tiende a disminuir el pH del sistema.



En cuanto a la remoción de mercurio en el lixiviado de suelo, el sulfato de aluminio presenta un mayor porcentaje de remoción de más del 50% mientras que la *Moringa oleifera* presenta una eficiencia del 1.6%.

### **Recomendaciones**

Se recomienda realizar estudios de riesgo ecológico que incluyan análisis de toxicidad en especies de la región o cercanas a las minas, con el fin de evaluar de manera específica los efectos de mercurio en dichos organismos.

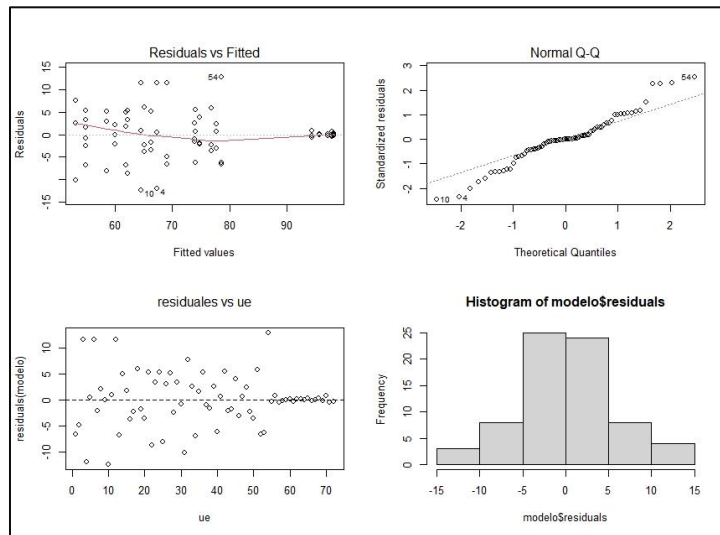
El análisis de riesgo a la salud humana muestra una aproximación de las condiciones a las cuales están expuestas las personas que trabajan en la zona, así como los habitantes de comunidades aledañas, sin embargo, debido a la naturaleza de los datos se recomienda realizar estudios más específicos que consideren datos exclusivos de la zona con el fin de tener un estudio más completo y con mayor precisión.

Se sugiere realizar mayor número de repeticiones en los experimentos de prueba de jarras con el fin de aumentar la posibilidad de detección de diferencias en los tratamientos para el modelo estadístico.

## ANEXOS

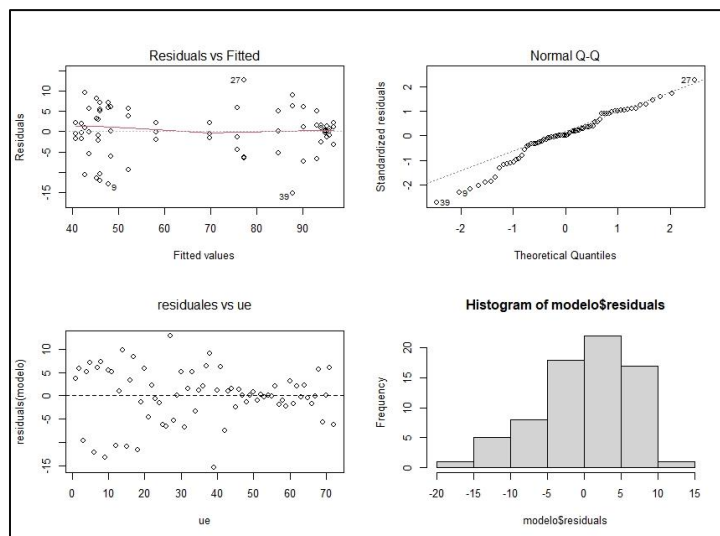
Supuestos del modelo estadístico, para el primer experimento:

El supuesto de independencia queda satisfecho ya que el experimento es completamente al azar. Para el caso de la normalidad se puede decir que cumple, aunque la distribución de los datos se encuentra cargado hacia las colas. Mientras que el supuesto de homogeneidad de varianzas se puede aceptar, aunque existen algunos puntos dispersos y no se encuentran en una sola banda, por lo que tal vez se tendría que realizar alguna transformación.



Supuestos del modelo estadístico, para el segundo experimento:

El supuesto de independencia queda satisfecho ya que el experimento es completamente al azar. Para el caso de la normalidad se puede decir que cumple, aunque la distribución de los datos se encuentra cargada hacia la izquierda. Mientras que el supuesto de homogeneidad de varianzas se puede aceptar, aunque existen algunos puntos dispersos y no se encuentran en una sola banda, por lo que tal vez se tendría que realizar alguna transformación.



## REFERENCIAS

- Abreu, M., Montel, A. L., y Scapin, E. (2020).** Use of Natural Coagulants/Flocculants in the Treatment of Hospital Laundry Effluents. ChemRxiv. Prepr.
- Ali, E. N., Muyibi, S. A., Salleh, H. M., Salleh, M. R. M., y Alam, M. (2009).** *Moringa oleifera* seeds as natural coagulant for water treatment. In Thirteenth international Egyptian water technology conference.
- Ali, M., Mustafa, A., y Saleem, M. (2019).** Comparative study between indigenous natural coagulants and alum for microalgae harvesting. Arabian Journal for Science and Engineering, 44(7), 6453-6463.
- Andía, Y. (2000).** Tratamiento de agua: coagulación y floculación. Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. SEDAPAL.
- Asrafuzzaman, M., Fakhruddin, A. N. M., y Hossain, M. (2011).** Reduction of turbidity of water using locally available natural coagulants. International Scholarly Research Notices, 2011.
- ASTM D2035-19.** Práctica estándar para la prueba en jarras de coagulación-floculación del agua. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). (1999).** Toxicological profile for mercury. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.
- Becerril, D.P. (2020).** Caracterización fisicoquímica del mucílago de nopal *Opuntia ficus indica* de Milpa Alta, Ciudad de México. Tesis para obtener el título de química de alimentos. Facultad de Química, UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México).
- Bernhoft, R. A. (2012).** Mercury toxicity and treatment: a review of the literature. Journal of environmental and public health. 2012. 10
- Bratby, J. (2016).** Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment. IWA publishing.
- Caldera, Y., Granadillo, K. W. L., y Laguna, E. D. J. M. (2019).** Eficiencia del coagulante opuntia ficus indica en aguas con alta turbidez y pH básico. Revista de Ingeniería Invención, 1(1), 11-26.

**Caldera, Y., Mendoza, I., Briceño, L., García, J., y Fuentes, L. (2007).** Eficiencia de las semillas de *Moringa oleifera* como coagulante alternativo en la potabilización del agua. Boletín del centro de investigaciones biológicas, 41(2), 244-254.

**Carrasco-Velázquez, B. E., Martínez-Hernández, E., y Ramírez-Arriaga, E. (2009).** Estratigrafía de la Formación El Morro del Paleoceno-Eoceno en Zimapán, Hidalgo. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. 61(3). 403-417.

**Castrillón, D. y Giraldo, M.A. (2012).** Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo b en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana. Requisito parcial para optar al título de Tecnólogo Químico. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

**Chitra, D. y Muruganandam, L. (2020).** Performance of Natural Coagulants on Greywater Treatment. Recent Innovations in Chemical Engineering (Formerly Recent Patents on Chemical Engineering), 13(1), 81-92.

**Choque, D., Choque, Y., Solano, A. M., y Ramos, B. S. (2018).** Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua. Tecnología Química. 38(2). 298-309.

**Clifton II, J. C. (2007).** Mercury exposure and public health. Pediatric Clinics of North America. 54(2). 237-269.

**Contreras, K.P., Aguas, J., Salcedo, G., Olivero, R. y Mendoza, G. P. (2015).** El Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua. Producción + Limpia. 10(1). 40- 50.

**Cortés, A., Lozano, A., Pérez, J. y Martínez, F. (2006).** Estudio exploratorio de las condiciones isotópicas e hidrogeoquímicas de afloramientos en la comunidad de El Arbolito, Municipio de Cadereyta, Qro. Centro Querétaro de Recursos Naturales.

**Cuello, S. (2015).** Biocumulación, toxicidad e interacción de metilmercurio y especies de selenio. Tesis para optar el grado de doctora. Universidad Complutense de Madrid.

**De la Torre, K. (10 de marzo de 2017).** Minería al límite: la pesadilla del mercurio en la Sierra Gorda de México. Mongabay. Recuperado de: <https://es.mongabay.com/2017/03/mexico-mineria-mercurio-sierra-gorda-queretaro/>

**Díaz, A., Rincon, N., Escorihuela, A., Fernandez, N., Chacin, E. y Forster, C.F. (1999).** A preliminary evaluation of turbidity removal by natural coagulants indigenous to Venezuela. *Process Biochemistry*. 35. 391-395

**Domínguez, M.F. (2010).** Optimización de la coagulación-floculación en la planta de tratamiento de agua potable de la sede recreacional Campoalegre – Cajasan. Proyecto de grado presentado como requisito para optar por el título de ingeniera ambiental. Universidad Pontificia Bolivariana.

**Español, S. (2012).** Contaminación con mercurio por la actividad minera. *Biomédica*. 32(3).

**Feria, J.J., Bermúdez, S. y Estrada, A.M. (2014).** Eficiencia de la semilla *Moringa oleifera* como coagulante natural para la remoción de la turbidez del río Sinú. *Producción+ limpia*. 9(1).

**Fitzgerald, W. F., Lamborg, C. H. (2007).** Geochemistry of mercury in the environment. *TrGeo*.

**Fuhrmann, M., Melamed, D., Kalb, P.D., Adams, J.W. y Milian L.W. (2002).** Sulfur polymer solidification/stabilization of elemental mercury waste, *Waste Manage*. 22, 327–333.

**Fúquene, D. M. y Yate, A. V. (2018).** Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales. Documentos de Trabajo ECAAPMA.

**Gad, S. C. (2014).** Methylmercury. Elsevier.

**Gaioli, M., Amoedo, D. y González, D. (2012).** Impacto del mercurio sobre la salud humana y el ambiente. *Archivos argentinos de pediatría*. 110(3). 259-264.

**Gandiwa, B. I., Moyo, L. B., Ncube, S., Mamvura, T. A., Mguni, L. L., y Hlabangana, N. (2020).** Optimisation of using a blend of plant based natural and synthetic coagulants for water treatment:(*Moringa oleifera-Cactus Opuntia*-alum blend). *South African Journal of Chemical Engineering*, 34, 158-164.

**Gaona, X. (2004).** El mercurio como contaminante global. Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente. Tesis para obtener el grado de Doctor en Química. Universidad Autónoma de Barcelona.

**Gómez, K.P. (2013).** Evaluación de rendimiento de extracción y caracterización fitoquímica de la fracción extraíble de semilla de Moringa (*Moringa oleifera* Lam.), a nivel laboratorio. Trabajo para obtener el título de ingeniero químico. Guatemala.

**Gómez, N.A. (2005).** Remoción de materia orgánica por coagulación-floculación. Trabajo de grado monográfico para optar el título de Ingeniero químico. Universidad Nacional de Colombia.

**Government of Canada. (2013).** Obtenido de Mercury: biogeochemistry: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/pollutants/mercury-environment/about/biogeochemistry.html>

**Guzmán, L., Taron, A. A., y Nuñez, A. (2015).** Polvo de la semilla Cassia fistula como coagulante natural en el tratamiento de agua cruda. Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial, 13(2), 123-129.

**Gworek, B., Dmuchowski, W., Baczewska, A. H., Brągoszewska, P., Bemowska-Kalabun, O., y Wrzosek-Jakubowska, J. (2017).** Air contamination by mercury, emissions, and transformations—a review. Water, Air, y Soil Pollution. 228(4). 123.

**Hernández-Silva, G., García-Martínez, R., Solís-Valdez, S., Martínez-Trinidad, S., Mercado-Sotelo, I., Ramírez-Islas, M., ... y Solorio-Munguía, G. (2012).** Presencia del Hg total en una relación suelo-planta-atmósfera al sur de la Sierra Gorda de Querétaro, México. TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas, 15(1), 05-15.

**Higueras, P. L., Esbrí, J. M., y Noguero, E. M. (2018).** El cinabrio, fuente del único metal pesado líquido. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. 26(3). 382.

**Huerta, D.F. (2020).** Evaluación de mercurio en sitios con actividad minera en México. Tesis para otra por el grado de maestro en ingeniería. UNAM. México.

**Hussain, S., Ghouri, A. S., y Ahmad, A. (2019).** Pinecone extract as natural coagulant for purification of turbid water. *Heliyon*, 5(3), e01420.

**INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2010).** Conceptos básicos del análisis de riesgos ambientales. Recuperado de: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/636/conceptos.pdf>

**INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2021).** Capítulo 1. Conceptos básicos del análisis de riesgo. Recuperado de: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/400/cap1.html>

**INEGI. (2005a).** Prontuario de información geográfica del municipio de Pinal de Amoles, Querétaro. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

**INEGI. (2005b).** Prontuario de información geográfica del municipio de Peñamiller, Querétaro. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

**Jagaba, A. H., Kutty, S. R. M., Hayder, G., Latiff, A. A. A., Aziz, N. A. A., Umaru, I., ... y Nasara, M. A. (2020).** Sustainable use of natural and chemical coagulants for contaminants removal from palm oil mill effluent: A comparative analysis. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(4), 951-960.

**Jodi, M. L., Birnin-Yauri, U. A., Yahaya, Y., y Sokoto, M. A. (2012).** The use of some plants in water purification. *Global Advanced Research Journal of Chemistry and Material Science*, 1(4), 71-75.

**Kazi, T., y Virupakshi, A. (2013).** Treatment of tannery wastewater using natural coagulants. *Development*, 2(8)

**Kuehl, R. O. (2001).** Diseño de experimentos: Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación.

**Liew, A. G., Noor, M. J. M. M., Muyibi, S. A., Fugara, A. M. S., Muhammed, T. A., y Iyuke, S. E. (2006).** Surface water clarification using *M. oleifera* seeds. *International journal of environmental studies*, 63(2), 211-219.

**Lorenzo-Acosta, Y. (2006).** Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*. 40(2). 10-17.

**Mandloi, M., Chaudhari, S., y Folkard, G. K. (2004).** Evaluation of natural coagulants for direct filtration. *Environmental technology*, 25(4), 481-489.

**Mangale Sapana, M., Chonde Sonal, G., y Raut, P. D. (2012).** Use of *Moringa oleifera* (drumstick) seed as natural absorbent and an antimicrobial agent for ground water treatment. *Research Journal of Recent Sciences*

**Manzo, M. (2019).** Remoción de arsénico y fluoruro de aguas subterráneas naturalmente contaminadas en Zimapán, Hidalgo mediante rocas calizas. Tesis para obtener el título de Ingeniera Geóloga. Facultad de Ingeniería, UNAM.

**Martínez, Al. (2017).** Método alternativo para tratar lixiviados maduros mediante el proceso de coagulación-floculación con mucílago de *Opuntia ficus indica*. Tesis para obtener el grado de maestro en ingeniería. Programa de maestría y doctorado en ingeniería, UNAM.

**Maurya, S., y Daverey, A. (2018).** Evaluation of plant-based natural coagulants for municipal wastewater treatment. *3 Biotech*, 8(1), 1-4.

**Mendoza, I., Fuentes, L., Caldera, Y., Perdomo, F., Suárez, A., Mosquera, N., y Arismendi, H. (2008).** Eficiencia de *Hylocereus lemairei* como coagulante-floculante en aguas para consumo humano. *Impacto Científico*, 3(1), 53-69.

**Meza-Leones, M., Riaños-Donado, K., Mercado-Martínez, I., Olivero-Verbel, R., y Jurado-Eraso, M. (2018).** Evaluación del poder coagulante del sulfato de aluminio y las semillas de *Moringa oleifera* en el proceso de clarificación del agua de la ciénaga de Malambo-Atlántico. *Revista UIS Ingenierías*, 17(2), 95-104.

**Montgomery, D.C. (2004).** Diseño de análisis de experimentos, 4ta edición, México editorial Limusa, 218 P.

**Mota, P.J. (2015).** Exploración, explotación y beneficio de Mercurio (Hg) en la mina "La Fe (fracción B)" La Plazuela, Peñamiller Querétaro. Manifestación de Impacto Ambiental Particular. Recuperado de: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgiraDocs/documentos/qro/estudios/2015/22QE2015MD010.pdf>



**Muruganandam, L., Kumar, M. S., Jena, A., Gulla, S., y Godhwani, B. (2017).** Treatment of wastewater by coagulation and flocculation using biomaterials. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 263, No. 3, p. 032006). IOP Publishing.

**Muyibi, S.A. y Alfugara, A.M.S. (2003).** Treatment of surface water with *Moringa oleifera* seed extract and alum a comparative study using a pilot scale water treatment plant. Intern. J. Environmental Studies. 60(6).617-626

**Muyibi, S.A. y Okuofu, C.A. (1995).** Coagulation of low turbidity surface waters with *Moringa oleifera* seeds. Intern. J. Environmental Studies. 48.263-273

**Ndabigengesere, A. y Subba, N. (1998).** Quality of water treated by coagulation using *Moringa oleifera* seeds. Wat.Res. 32.3.781-791

**Ndabigengesere, A., Narasiah, K. S., y Talbot, B. G. (1995).** Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. Water research. 29(2). 703-710.

**NOM-141-SEMARNAT-2003, N.O. (2004).** Que estable el procedimiento para caracterizar jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales. México: SEMARNAT.

**Nordberg, G. (2017).** Metales: Propiedades químicas y toxicidad productos químicos. Recuperado de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/Enciclopedia>.

**Núñez, A., Sánchez, J.A. y Castillo, F. (2007).** Inventario físico de los recursos minerales del municipio Pinal de Amoles, Querétaro. Fideicomiso de Fomento Minero. Servicio Geológico Mexicano.

**Ochoa, G. (2021).** Uso del mucílago de nopal como una alternativa para el tratamiento del agua residual proveniente de la hemodiálisis y diálisis. Tesis que para optar el grado de maestra en ingeniería ambiental. UNAM. México.

**Olivares, R.I. (2017).** El mercurio: sus efectos tóxicos en el medio ambiente con repercusión en la salud humana y ámbito odontológico. Tesina para obtener el título de Cirujana Dentista. Facultad de Odontología, UNAM.

**Olivero, R.E., Aguas, Y. D. R., Mercado, I. D., Casas, D. P. y Montes, L. E. (2014).** Utilización de Tuna (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas. Avances: Investigación en Ingeniería. 11(1). 70-75.

**Olivero, R.E., Mercado, I.D. y Montes, L.E. (2013).** Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucílago del nopal *Opuntia ficus-indica*. Producción+ Limpia, 8(1).

**OMS (Organización Mundial de la Salud). (2017).** La minería aurífera artesanal o de pequeña escala y la salud. Recuperado de: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/259452/9789243510279-spa.pdf;sequence=1>

**Park, J. D. y Zheng, W. (2012).** Human exposure and health effects of inorganic and elemental mercury. Journal of preventive medicine and public health. 45(6). 344.

**Patale, V., y Pandya, J. (2012).** Mucilage extract of *Coccinia indica* fruit as coagulant-flocculent for turbid water treatment. Asian J Plant Sci Res, 2(4), 442-445.

**Pérez, E. M., y Herrera, A. J. (2013).** Minas y mineros: presencia de metales en sedimentos y restos humanos al sur de la Sierra Gorda de Querétaro en México. Chungará (Arica). 45(1). 161-176.

**PNUMA. (2017).** Convenio de Minamata Sobre el Mercurio, Texto y Anexos.

**Pritchard, M., Craven, T., Mkandawire, T., Edmondson, A. S. y O'neill, J. G. (2010).** A comparison between *Moringa oleifera* and chemical coagulants in the purification of drinking water—An alternative sustainable solution for developing countries. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 35(13-14). 798-805.

**Pritchard, M., Mkandawire, T., Edmondson, A., O'neill, J. G., y Kululanga, G. (2009).** Potential of using plant extracts for purification of shallow well water in Malawi. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 34(13-16), 799-805.

**Quispe, H.G. (2012).** Aplicación del mucílago extraído de nopal *Opuntia ficus-indica* en la clarificación del agua del Río Uchusuma. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico. Tacna, Perú.

**Qureshi, K., Bhatti, I., y Shaikh, M. S. (2011).** Development of bio-coagulant from mango pit for the purification of turbid water. Sindh University Research Journal-SURJ (Science Series). 43(1).

**R Core Team (2022).** R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

**Rodríguez, A. (1985).** Notas para el estudio del azogue en México en el siglo XVII. Estudios de Historia Novohispana. 8(008).

**Rodríguez, S., Muñoz, R., García, O. y Fernández, E. (2005).** Empleo de un producto coagulante natural para clarificar agua. Revista CENIC. Ciencias Químicas, 36.

**SADA (Spatial Analysis and Decision Assistance). (2021).** Recuperado de: <https://www.sadaproject.net/>

**Šćiban, M. B., Klašnja, M. T., y Stojimirović, J. L. (2005).** Investigation of coagulation activity of natural coagulants from seeds of different leguminose species. Acta Periodica Technologica, (36), 81-90.

**Šćiban, M., Klašnja, M., Antov, M., & Škrbić, B. (2009).** Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn. Bioresource technology, 100(24), 6639-6643.

**Selin, N. E. (2009).** Global biogeochemical cycling of mercury: a review. Annual review of environment and resources. 34.

**SGM (Servicio Geológico Mexicano). (1998).** Carta geológico-minera. Peñamiller F14-C47. Recuperado de: <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/>

**SGM (Servicio Geológico Mexicano). (2019).** Panorama minero del estado de Querétaro. Dirección de Investigación y Desarrollo.

**SGM (Servicio Geológico Mexicano). (2021).** Portal Geoinfomex. Tomado de: <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/>

**Shilpaa, B., Akankshaa, K., y Girish, P. (2012).** Evaluation of cactus and hyacinth bean peels as natural coagulants. International Journal of Chemical and Environmental Engineering, 3(3).

**Stewart, R. N. y Purucker, S. T. (2006).** SADA: a freeware decision support tool integrating GIS, sample design, spatial modeling, and risk assessment. The Institute for Environmental Modeling. University of Tennessee, USA.

**Suopajärvi, T. (2015).** Functionalized nanocelluloses in wastewater treatment applications. Acta Universitatis Ouluensis C, 526.

**Teh, C. Y., Budiman, P. M., Shak, K. P. Y., y Wu, T. Y. (2016).** Recent advancement of coagulation–flocculation and its application in wastewater treatment. Industrial y Engineering Chemistry Research. 55(16). 4363-4389.

**Trujillo, D., Duque, L. F., Arcila, J. S., Rincón, A., Pacheco, S., y Herrera, O. F. (2014).** Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. Revista Ion. 27(1). 17-34.

**USEPA (1991).** Risk Assessment Guidance for Super fund. Recuperado de: <https://www.epa.gov/risk/superfund-risk-assessment-human-health-topics>

**USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). (2007).** Treatment Technologies for Mercury in Soil, Waste, and Water. Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, Washington, DC 20460.

**USEPA (United States Environmental Protection Agency). (1998).** Guidelines for Ecological Risk Assessment. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.

**USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2000).** Risk Characterization Handbook. Office of Research and Development.

**USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2014).** Guidance for Calculating the 95% Upper Confidence Level for Demonstrating Compliance with the Remediation Standar Regulations. Recuperado de: [https://portal.ct.gov/-/media/DEEP/site\\_clean\\_up/remediation\\_regulations/95UCLGuidancepdf.pdf](https://portal.ct.gov/-/media/DEEP/site_clean_up/remediation_regulations/95UCLGuidancepdf.pdf)

**USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2020).** Basic Information about Mercury.

Recuperado de: <https://www.epa.gov/mercury/basic-information-about-mercury>

**USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2022).** Guidelines for Ecological Risk

Assessment. Recuperado de: <https://www.epa.gov/risk/guidelines-ecological-risk-assessment>

**Vaca Mier, M., López Callejas, R., Flores Rodríguez, J., Terres Peña, H., Lizardi Ramos, A., y Rojas Valencia, M. N. (2014).** Aplicación del nopal (*Opuntia ficus indica*) como coagulante primario de aguas residuales. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica. 7(3). 210-216.

**Vázquez, C. (2008).** Especiación de mercurio en el medio ambiente. Isagogé. 5.

**Vélez, J.M., Sánchez, J.A. y Castillo, F. (2007).** Inventario físico de los recursos minerales del municipio Peñamiller, Querétaro. Fideicomiso de Fomento Minero. Servicio Geológico Mexicano.

**Villabona, Á., Paz, I. C., y Martínez, J. (2013).** Caracterización de la *Opuntia ficus-indica* para su uso como coagulante natural. Revista Colombiana de Biotecnología. 15(1). 137-144.

**Volke, S. y Velásco, T. (2002).** Tecnologías de remediación para Suelos Contaminados. México:INE-SEMARNAT

**Wang, J., Feng, X., Anderson, C. W., Xing, Y. y Shang, L. (2012).** Remediation of mercury contaminated sites—a review. Journal of hazardous materials. 221. 1-18.

**WHO (World Health Organization). (2010).** Human Health Risk Assessment Toolkit: Chemical Hazards. International Programme on Chemical Safety.

**WHO. (2017).** Guidelines for Drinking Water Quality. Recommendations. Fourth ed. World Health Organization, Geneva, Switzerland.

**Wilson, B. W., Hernández, J.P., Meave, E. (1955).** Un banco calizo del Cretácico en la parte oriental del estado de Querétaro, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. 18.1-10.

**Yarto, M., Gavilán, A. y Castro, J. (2004).** La contaminación por mercurio en México. *Gaceta ecológica*. (72). 21-34.

**Yin, C. Y. (2010).** Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*. 45(9). 1437-1444.

**Zenil, R. (2022).** Evaluación de la ecotoxicidad de los lixiviados de jales y suelos mineros. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Ambiental. UNAM. (En proceso).

**Zhang J, Bishop PL. (2002).** Stabilization/solidification (S/S) of mercury-containing wastes using reactivated carbon and Portland cement. *J Hazard Mater*. 92(2):199-212.

**Zhuang, J.M., Lo, T, Walsh, T y Lam, T. (2004).** Stabilization of high mercury contaminated brine purification sludge, *J. Hazard. Mater*. 113, 157–164.