

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE COACALCO

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DEL MÉTODO DE
SEDIMENTACIÓN/ESTABILIZACIÓN EN SUELOS
CONTAMINADOS CON ARSÉNICO

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTA:
Ángel Antonio Sánchez Carlos

MATRICULA:
201320476

DIRECTORA:
Mtra. Lilia Adriana Ríos Alducin

Coacalco de Berriozábal, Méx., enero 2024

CAPÍTULO I

Generalidades del Proyecto

CAPÍTULO II

Marco Teórico

CAPÍTULO III

Desarrollo

CAPÍTULO IV

Resultados

Conclusiones

Referencias Bibliográficas

Competencias Aplicadas

ÍNDICE

CAPITULO I. GENERALIDADES DEL PROYECTO	7
1.1. Introducción	8
1.2. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)	9
1.3. Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR)	11
1.4. Objetivos	12
1.4.1. Objetivo General	12
1.4.2. Objetivos Particulares	12
1.5. Problemática	13
1.6. Justificación	14
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO	15
2.1. Impacto ambiental de la industria en el medio ambiente	16
2.2. Contaminantes presentes en el sitio del caso de estudio	17
2.3. Arsénico	17
2.4. Arsénico en el medio ambiente	18
2.5. Contacto con arsénico	19
2.6. Efectos sobre la salud	20
2.7. Toxicidad de las especies de arsénico	21
2.8. Arsénico en aguas subterráneas	22
2.9. Arsénico en el medio ambiente	23
2.10. Normatividad aplicable al caso	24
2.11. Técnicas para el tratamiento de arsénico en el caso de estudio	26
2.12. Método de Solidificación/Estabilización (S/E)	26
2.13. Aspectos técnicos del método de Solidificación/Estabilización	27
2.14. Agentes utilizados en el proceso de Solidificación/Estabilización	28
2.15. Mecanismos	29
2.16. Cemento Portland	30
2.17. Una mirada a la química del cemento Portland	30
2.18. Componentes del cemento Portland	31
2.19. Factores que afectan la selección y realización de los procesos de S/E	32
2.20. Características de residuo	33
2.21. Objetivos del tratamiento	34
2.22. Tipos de procesos y necesidades del tratamiento	34

2.22.1.	Destino final del producto S/E	34
2.22.2.	Aspectos económicos	34
2.23.	Factores que considerar para la disposición de residuos estabilizados con cemento	35
2.23.1.	Acción física	35
2.23.2.	Agentes químicos.....	35
2.23.3.	Ataque por disolución.....	36
2.23.4.	Ataque por descomposición química	36
CAPITULO III. METODOLOGÍA		37
3.1.	Metodología.....	38
3.2.	Analizar los datos referentes al seguimiento de la situación actual del caso 39	
3.3.	Determinar los aspectos legales y normativos aplicables al caso de estudio.....	40
3.4.	Modelar la zona afectada por arsénico mediante ArcGIS	42
3.5.	Elaborar una Propuesta de Remediación acorde a la problemática.....	42
3.5.1.	Realizar el levantamiento del sitio contaminado	42
3.5.2.	Identificar las zonas contaminadas con arsénico	43
3.5.3.	Realizar el muestreo del área contaminada.....	43
3.5.4.	Determinar el alcance de los contaminantes tanto en el suelo y cuerpos de agua.....	43
3.5.5.	Graficar y analizar los resultados obtenidos del muestreo	43
3.5.6.	Implementar la aplicabilidad jurídica al proyecto.....	43
3.5.7.	Establecer el método de remediación del suelo.....	43
3.5.8.	Planificar la disposición final de los residuos.....	44
3.6.	Método experimental	44
3.7.	Materiales y métodos.....	45
3.7.1.	Materiales para el tratamiento de arsénico mediante el fraguado de concreto bentónico.....	45
3.7.1.1.	Cemento Portland.....	45
3.7.1.2.	Arena	45
3.7.1.3.	Grava	45
3.7.1.4.	Agua	45
3.7.1.5.	Sales metálicas.....	45
3.7.1.6.	Hormigón	46
3.8.	Métodos que considerar para el proceso de S/E	46

3.8.1. Resistencia a la compresión.....	46
3.8.2. Prueba de lixiviación PECT.....	47
3.9. Determinación de metales por absorción atómica.....	47
3.10. Determinación de no-peligrosidad	48
3.11. Precauciones	48
CAPITULO IV. RESULTADOS	50
4. Modelación de la pluma de contaminación	51
4.1. Gráficos ArcGis.....	57
4.1.1. Muestreo a 1.5 m.....	57
4.1.2. Muestreo a 3.0 m.....	58
4.1.3. Muestro a 4.0 m.....	59
4.1.4. Muestreo a 6.0 m.....	60
4.1.5. Muestreo a 7.0 m.....	61
4.2. Análisis de datos.....	62
4.3. Propuesta de Remediación	63
4.3.1. Proceso de la Propuesta de Remediación	63
4.3.2. Aspectos jurídicos del proceso	65
Conclusiones.....	69
Competencias desarrolladas o aplicadas	71
Referencias bibliográficas.....	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Muestreo de caracterización de agua en acuicludos. Fuente: SEMARNAT, 2019.	23
Tabla 2. Concentraciones de referencia totales (CRT) por uso de suelo. Fuente: SEMARNAT, 2004.	25
Tabla 3. Agentes solidificantes y estabilizantes en sistemas S/E empleados en suelos contaminados. Fuente: Castro, et. al.	29
Tabla 4. Composición del cemento Portland. Fuente: Hills et al 2007.	31
Tabla 5. Límites máximos permisibles (LMP) para los constituyentes tóxico en el extracto de procedimiento de extracción de constituyentes (PECT) y base seca. Fuente: SEMARNAT, 2011.	49
Tabla 6. Resultados del MFC de arsénico. Fuente: SEMARNAT, 2019.	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la aplicación del método de Solidificación/Estabilización. Fuente: EPA, 2003.	27
Figura 2. Diagrama de bloques del método de Solidificación/Estabilización. Fuente: Pérez, 2016.	30
Figura 3. Metodología teórica del proyecto. Fuente: Elaboración Propia.	38
Figura 4. Metodología práctica del proyecto. Fuente: Elaboración Propia.	42
Figura 5. Captura de pantalla ArcGIS. Fuente: Elaboración Propia.	51
Figura 6. Contaminación por As a 1.5 m. 2019. Fuente: Elaboración Propia.	57
Figura 7. Contaminación por As a 3.0 m. 2019. Fuente: Elaboración Propia.	58
Figura 8. Contaminación por As a 4.0 m. 2019. Fuente: Elaboración Propia.	59
Figura 9. Contaminación por As a 6.0 m. 2019. Fuente: Elaboración Propia.	60
Figura 10. Contaminación por As a 7.0 m. 2019. Fuente: Elaboración Propia.	61

Resumen

En este trabajo se tratará un caso de estudio proporcionado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), propio del análisis técnico de la conclusión del Programa de Remediación y cuyo promovente ha adjuntado una serie de documentos, los cuales están relacionados con los datos solicitados por la secretaría anteriormente mencionada. En este escrito se encuentra dicha información, además de los aspectos teóricos necesarios para el desarrollo del proyecto y de los documentos que de este mismo resulten. Dicho lo anterior, en paralelo con el análisis de la información disponible, se integra una propuesta de remediación hipotética, no obstante, se llevará a cabo teniendo en cuenta la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) y su reglamento, considerando también, las normas aplicables para al formular la misma, además de la adición de un modelo de la pluma de contaminación por arsénico teniendo como referencia los resultados obtenidos de la caracterización entregados por el responsable de la contaminación.

La aplicación de la LGPGIR y su reglamento para la conclusión de los objetivos del proyecto, se debe principalmente a que ésta misma es la que garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación (PROFEPA, 2016).

CAPÍTULO I

Generalidades del Proyecto

1.1. Introducción

Actualmente, la actividad industrial representa una parte importante del desarrollo económico de un país, y dada la relevancia que ésta tiene en los distintos ámbitos en los que se pueden especializar, pueden contribuir del mismo modo con la satisfacción de necesidades varias en la cotidianidad y es posible apreciar la existencia de varios sectores industriales, tales como: manufacturero de productos alimenticios y bebidas, minero, automotriz, farmacéutico, constructor, transporte, textil, metalúrgico, energético, extractor, entre otros (González, 2015). Sin embargo, no es novedad que la satisfacción de estas necesidades no está exenta de inconvenientes, el más obvio, es el impacto ambiental que la actividad industrial genera, en la forma de contaminación ya sea de agua, suelo o en la atmósfera.

Teniendo en mente lo anterior, debido al uso de una amplia gama de sustancias altamente nocivas, tóxicas y/o peligrosas en los procesos productivos por parte de las empresas pertenecientes a la industria química, existe una considerable probabilidad de que las labores que desarrollan las mismas, resulten en uno o varios casos de impacto al medio ambiente. Adicionalmente, estos incidentes pueden presentar distintos grados de gravedad, según el tipo de sustancia y cantidad en caso de sean vertidas o liberadas en agua, suelo y atmósfera, además de las distintas condiciones y características que presenten estos últimos. Y para el caso en turno, particularmente en el suelo y subsuelo.

Es menester aclarar que el impacto ambiental generado por la actividad industrial puede ser provocado por accidentes, negligencia y/o por eventos de variada naturaleza que pueden afectar las instalaciones, vulnerando contenedores o los equipos de maquinaria involucrados en los procesos productivos. No obstante, tal como se menciona en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), en su Capítulo V, Artículo 69; *“Las personas responsables de actividades relacionadas con la generación y manejo de materiales y residuos peligrosos que hayan ocasionado la contaminación de sitios con éstos, están obligadas a llevar a cabo las acciones de remediación conforme a lo dispuesto en la presente Ley y demás disposiciones aplicables”*.

La contaminación de los suelos implica un serio riesgo a la salud humana y a los distintos ciclos y sistemas naturales, además de los organismos que dependen del mismo. Comprendiendo lo anterior, la presencia de altas concentraciones de arsénico, producto de años de liberación debido a una falla en los equipos destinados a su almacenamiento, ha desembocado en un incidente sumamente grave en el predio perteneciente a la empresa del caso de estudio. Tal es el impacto ambiental que varios cuerpos de agua en el subsuelo podrían verse comprometidos y las características del contaminante favorecen su diseminación a través de la atmósfera. Por ello se requiere de un método de remediación eficiente que permita la remoción de una gran cantidad de dicha sustancia evitando la infiltración y diseminación del mismo, además de permitir el cumplimiento por parte de dicha organización a través de las disposiciones mencionadas en la LGPGIR.

1.2. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es la dependencia de gobierno que tiene como propósito fundamental, constituir una política de Estado de protección ambiental, que revierta las tendencias del deterioro ecológico y sienta las bases para un desarrollo sustentable en el país. A través de una visión que busca que exista un país en el que todos abriguen una profunda y sincera preocupación por cuidar y conservar todo cuanto la naturaleza ha dado a nuestra patria, conciliando el genio humano con el frágil equilibrio de los demás seres vivos y su medio ambiente para alcanzar el desarrollo sustentable. Sus principales objetivos y funciones son:

Promover procesos de desarrollo de capacidades para la gestión ambiental entre los servidores públicos de los tres niveles de gobierno y la sociedad, así como consolidar sus potencialidades.

1. Contribuir a incrementar la capacidad de gestión ambiental de la sociedad y elevar sus niveles de bienestar, a través del conocimiento y la puesta en práctica de elementos normativos, conceptuales y metodológicos.
2. Impulsar y difundir procesos productivos que articulen factores socioculturales, económicos y ecológicos para el aprovechamiento integral y diversificado de los recursos.
3. Promover procesos corresponsables de participación ciudadana en la conservación, protección y restauración ambiental y en el aprovechamiento sustentable de los recursos que coadyuven al desarrollo regional.
4. Promover la formación de valores culturales y pautas de comportamiento en la sociedad, que propicien su participación corresponsable, acorde con los cambios que implica el desarrollo sustentable.
5. Promover la incorporación de la dimensión ambiental en el Sistema Educativo Nacional, para la formación de valores culturales que coadyuven en la prevención, mitigación y solución de la problemática ambiental del desarrollo, y propicien prácticas adecuadas de consumo.
6. Impulsar la formación y actualización de profesionistas especializados en la protección al ambiente y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales.

7. Promover la incorporación de la dimensión ambiental en la formación profesional de las distintas carreras, a fin de propiciar que las prácticas de los egresados prevengan y disminuyan los efectos negativos sobre el ambiente.
8. Fortalecer la participación de los distintos sectores de la población, en acciones de protección al ambiente, que conduzcan a patrones de consumo más favorables, como elemento esencial de la sustentabilidad del desarrollo.
9. Coordinar las actividades de educación, culturales y de capacitación para el fortalecimiento institucional que promuevan otras áreas de la Secretaría y sus órganos administrativos desconcentrados, para optimizar recursos y mejorar procesos.
10. Promover acuerdos de cooperación con organismos multilaterales, con base en la demanda de la sociedad civil organizada y en la detección de necesidades de las instancias oficiales.
11. Coordinar la realización y evaluación de proyectos y servicios en materia de educación, cultura y capacitación del sector, que se convengan con organismos internacionales y multilaterales en apoyo al cumplimiento de las atribuciones asignadas.
12. Coadyuvar a la formación de nuevos valores y actitudes hacia el medio ambiente y el aprovechamiento de los recursos naturales.
13. Sistematizar y difundir información, a través de medios impresos y electrónicos, en apoyo de las actividades y proyectos que lleva a cabo el Centro, en materia de educación, cultura y capacitación para el aprovechamiento sustentado.

Estrategias prioritarias:

1. Fortalecer y apoyar la participación social en la gestión ambiental.
2. Fortalecer a las instituciones y las capacidades sociales para el desarrollo sustentable, a través de la educación y la capacitación.
3. Aprovechar la estructura educativa escolarizada para la promoción de valores, actitudes y capacidades sociales tendientes a un desarrollo sustentable.

1.3. Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR)

La Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR). Dentro de ésta misma, dichas actividades están encaminadas a brindar atención a los casos en los que se presentan emergencias y pasivos ambientales mediante el respaldo de la normativa y legislación adecuadas para la situación de un caso y, del mismo modo, para los contaminantes presentes en éstos mismos.

La DGGIMAR se encarga de revisar, evaluar y expedir la aprobación de las Propuestas de Remediación, aunado a lo anterior, también se lleva a cabo el seguimiento del proceso de conclusión del programa de remediación, la elaboración de los resolutivos (documentos que acreditan que la Propuesta de Remediación, entregada por el promovente, ha sido cumplida o no), el registro de datos del promovente, el análisis de los resultados de laboratorio entregados por el mismo, la modelación a través de ArcGIS del área contaminada, antes y después de las actividades de remediación.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Analizar la eficiencia del método de solidificación/estabilización, el cual fue utilizado para la remediación de suelos contaminados con arsénico mediante la aplicación de recursos técnicos, legislativos y normativos, coadyuvando a la resolución del caso.

1.4.2. Objetivos Particulares

1. Analizar los datos referentes al seguimiento de la situación del actual e histórica del caso proporcionada por el promovente y de la Autoridad Ambiental (SEMARNAT y PROFEPA).
2. Determinar aspectos legales y normativos aplicables al caso de estudio.
3. Modelar la zona afectada con arsénico mediante el programa ArcGIS.
4. Elaborar una Propuesta de Remediación acorde a la problemática.

1.5. Problemática

La situación actual del caso de estudio referente a la contaminación del suelo con arsénico por parte de una empresa del sector químico comprende la aplicación de un proceso de remediación sin la previa aprobación de la SEMARNAT. La técnica aplicada no es común en el país, por lo que únicamente existen tres empresas autorizadas para su aplicación. Así mismo, la información ingresada en el trámite por la empresa presenta discrepancias respectivas a lo solicitado por la LGPGIR, el reglamento de la anterior ley y la propia SEMARNAT; en lo que refiere a las condiciones emitidas por esta misma en los diferentes oficios enviados a dicha empresa. Entre las cuales se pueden mencionar:

- La caracterización deficiente respecto de la pluma de contaminación, ya que la empresa en turno presentó un **Muestreo Final Comprobatorio (MFC)** de acuerdo con el punto de muestreo **IQ-11 @ 3.0m**, procedimiento que no fue solicitado y resultado del cual se identificó que no corresponde a contaminación puntual. Por el contrario, se solicitó la caracterización de dos zonas llamadas **ZT-A** y **ZP-B** **sin que la empresa atendiera dicha petición.**
- Volviendo a hacer referencia al punto **IQ-11 @ 3.0m**, mismo que revela que la extensión del contaminante es mayor a lo que inicialmente se reportó a SEMARNAT. Así mismo, no se presentaron las coordenadas ni profundidad de los puntos de muestreo en los vértices de la excavación, incluso en el segundo MFC llevado a cabo por la empresa.
- Es posible apreciar, que la empresa realizó labores de excavación del suelo contaminado con arsénico, antes de que la DGGIMAR emitiese las condiciones y acciones apropiadas para el caso mediante un Resolutivo. Por otro lado, no se define el rango de infiltración y expansión del contaminante. Con ello no se puede determinar el grado de limpieza y/o extracción de arsénico en el área correspondiente al punto **IQ-11 @ 3.0m.**
- En varios documentos del caso, se hace mención del proceso de **Solidificación/Estabilización (S/E)**, dicho método fue empleado por los anteriores dueños del sitio, sin embargo, se explica que a pesar de que existe una estabilización del contaminante, como resultado del estudio de riesgo ambiental, realizado por la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), se encontró evidencia que sugiere que el mismo se está desestabilizando. Sin embargo, estos estudios no son suficientes para negar la Propuesta de Remediación.

1.6. Justificación

El presente proyecto se enfocará en otorgar las bases teóricas y prácticas al respecto de la resolución de la evaluación del proceso de remediación de suelos contaminados por parte de una empresa del sector químico, mediante la aplicación del método de Solidificación/Estabilización (S/E). Con fundamento en lo anterior, se presentarán una serie de distintos resultados apegados a lo solicitado por la NOM-147-SSA1-2004, LGPGIR y su reglamento; así como la adición de la modelación de la pluma del área contaminada y el desarrollo de una Propuesta de Remediación (PR).

Lo anterior tiene la finalidad de brindar un escenario, en donde los recursos normativos y legales, en conjunto con las técnicas y tecnología para la remediación de suelos y los conocimientos adquiridos por la carrera de Ingeniería Ambiental serán empleados para la resolución y conclusión de un caso. El área en cuestión es un predio con uso de suelo industrial, el cual tiene un amplio historial de contaminación, principalmente, arsénico. Hasta la fecha el tratamiento para la remediación del sitio ha sido poco eficiente y ha presentado diversos problemas, debido a la errónea aplicación de la técnica de S/E y a las inconsistencias del muestreo para determinar las zonas con mayor contaminación.

CAPÍTULO II

Marco Teórico

2.1. Impacto ambiental de la industria en el medio ambiente

Está claro que el ser humano, con el paso del tiempo, va dejando su marca en el territorio que habita. Sin embargo, esto se ha potenciado desde la expansión de los procesos industriales, y no precisamente para bien. A continuación, profundizaremos acerca de los efectos de este desarrollo en el medio ambiente.

Desde 1992, cuando se celebró la Cumbre de Río, la Organización de las Naciones Unidas ha dejado claro que tanto el ser humano como la naturaleza son elementos indispensables para un desarrollo sostenible. En esa cumbre, los países miembros se comprometieron a regular y reducir el impacto negativo del crecimiento industrial sobre el planeta Tierra. No obstante, un cuarto de siglo después de aquella cita, el panorama no es nada alentador. Los datos sobre la contaminación y el cambio climático son cada vez más alarmantes. Lamentablemente, los principales actores involucrados (gobiernos y compañías multinacionales) no parecen decididos a cambiar el rumbo destructivo al que la raza humana ha tomado.

Actualmente, es bien conocido el impacto que el desarrollo industrial tiene sobre el medio ambiente, ya sea resultado del proceso de producción o de los residuos de este último, es innegable que existe una creciente necesidad de regular y revertir, en la medida de lo posible, los efectos que se generan por parte de éste; puesto que, la abundancia y calidad de los recursos naturales se ve afectada.

En particular, la industria química, cuyo impacto es categóricamente significativo, ya que, además de la generación de ruido, la generación de efluentes contaminados y residuos; la actividad de esta misma comprende el uso de sustancias altamente nocivas y tóxicas en sus procesos de producción. En orden de lo anterior, también los accidentes, fugas o fallos en la producción, forman parte de los factores que influyen en el impacto que la actividad industrial tiene sobre el medio ambiente.

Asimismo, los residuos de los procesos de fabricación, así como los gases que estos emiten, afectan cada vez con mayor gravedad a la calidad del aire y del agua, entre muchos otros aspectos. Estos dos factores se ven potenciados, además, por las consecuencias globales de todas y cada una de las acciones del hombre sobre el medio ambiente. Así, se distinguen los siguientes tipos de contaminación:

- Atmosférica.
- Del aire.
- Hídrica.
- Del suelo.
- Lumínica.
- Sonora.
- Térmica.
- Visual.
- Radioactiva.
- Electromagnética.
- Alimentaria.

2.2. Contaminantes presentes en el sitio del caso de estudio

De acuerdo con la información disponible, diversas instituciones llevaron a cabo muestreos y la especiación de arsénico que arrojó datos referentes a la presencia de Trióxido de arsénico (As III) y Pentóxido de arsénico (As V) en el sitio contaminado del caso de estudio. No obstante, dicha información por el momento continua bajo resguardo de la secretaría en turno, debido al estado en el que se encuentra el proceso de remediación del sitio, es por esto mismo y con base en los términos de la SEMARNAT para la realización de este escrito, que estas se encuentran ausentes en el mismo.

2.3. Arsénico

El arsénico es un elemento ampliamente distribuido en la corteza terrestre. El arsénico ha sido clasificado químicamente como un metaloide, con propiedades tanto de metal como de elemento no metálico; sin embargo, se le refiere frecuentemente como un metal. El arsénico elemental (llamado también arsénico metálico) es un material sólido de color gris acero. Sin embargo, en el ambiente el arsénico generalmente se encuentra combinado con otros elementos como por ejemplo oxígeno, cloro y azufre. El arsénico combinado con estos elementos se conoce como arsénico inorgánico. El arsénico combinado con carbono e hidrógeno se conoce como arsénico orgánico (OMS, 2018).

La mayoría de los compuestos inorgánicos y orgánicos de arsénico son polvos de color blanco, que no se evaporan. No tienen olor y la mayoría no tiene ningún sabor especial. Por esta razón, generalmente no se puede saber si están presentes en los alimentos, el agua o el aire.

El arsénico inorgánico se encuentra naturalmente en el suelo y en muchos tipos de rocas, especialmente en minerales que contienen cobre o plomo. Cuando estos minerales se calientan en hornos, la mayor parte del arsénico se elimina a través de la chimenea en forma de un polvo fino que entra a la atmósfera. Las fundiciones pueden recuperar este polvo y remover el arsénico en la forma de un compuesto llamado trióxido de arsénico (As_2O_3). Sin embargo, el arsénico ya no se produce en Estados Unidos; todo el arsénico usado en Estados Unidos es importado (OMS, 2018).

Actualmente, aproximadamente 90% del arsénico que se produce es usado como preservativo para madera, para que esta no se deteriore o se pudra. El preservativo es el arsenato cromado de cobre (CCA) y a la madera tratada se le refiere como madera presurizada. En el año 2003, los productores de preservativos para tratar madera que contienen arsénico en Estados Unidos iniciaron voluntariamente la transición de CCA a otros preservativos que no contienen arsénico, para uso en, por ejemplo, estructuras en donde juegan niños, mesas para picnic, terrazas de madera, cercas y entablados para caminar. Esta transición se completó el 31 de diciembre del año 2003; sin embargo, la madera que fue tratada con anterioridad a esta fecha aún podría usarse, y las estructuras fabricadas con madera presurizada con CCA no serían afectadas. Los productos de madera presurizada con CCA continúan siendo usados en aplicaciones industriales. No

se sabe en qué grado los productos de madera presurizada contribuyen, si lo hacen del todo, a la exposición de la población al arsénico (OMS, 2018).

En el pasado, los compuestos inorgánicos de arsénico se usaron predominantemente como plaguicidas, principalmente en cosechas de algodón y huertos frutales. Actualmente, los compuestos inorgánicos de arsénico no se pueden usar en la agricultura. Sin embargo, los compuestos orgánicos de arsénico, específicamente el ácido cacodílico, el arsenato de metilo bisódico (DSMA) y el arsenato de metilo monosódico (MSMA), aun se usan como plaguicidas, principalmente en algodón. Algunos compuestos orgánicos de arsénico se usan como suplementos en alimentos para animales. Cantidades pequeñas de arsénico metálico se agregan a otros metales para formar mezclas de metales o aleaciones con mejores características físicas. El uso más extenso de las aleaciones de arsénico es en baterías para automóviles. Otro uso importante de los compuestos de arsénico es en semiconductores y en diodos que emiten luz (OMS, 2018).

2.4. Arsénico en el medio ambiente

El arsénico se encuentra naturalmente en el suelo y en minerales, por lo tanto, este mismo puede ser transportado vía aérea y a través de cuerpos de agua. También puede ingresar al agua en por escorrentía o por filtración. Las erupciones volcánicas constituyen otra fuente de exposición arsénico al ambiente. Asimismo, arsénico está asociado con minerales que se minan para extraer metales, por ejemplo, cobre y plomo, y puede entrar al ambiente cuando se extraen o funden estos minerales. También se pueden liberar a la atmósfera cantidades pequeñas de arsénico desde plantas de carbón y desde incineradores porque a menudo el carbón y los productos de desecho contienen arsénico (OMS, 2018).

El arsénico no puede ser destruido en el ambiente, solamente puede cambiar de forma, adherirse o separarse de partículas; puede cambiar de forma al reaccionar con oxígeno o con otras moléculas presentes en el aire, agua o suelo, o por la acción de bacterias que viven en el suelo o en el sedimento. También se libera a través plantas de energía y otros procesos de combustión generalmente, adherido a partículas muy pequeñas. Del mismo modo, su contenido en polvo se encuentra generalmente en partículas más grandes, estas mismas se depositan en el suelo o son removidas del aire por la lluvia. Se encuentra adherido a partículas muy pequeñas puede permanecer en el aire varios días y puede movilizarse largas distancias. Muchos compuestos comunes de arsénico pueden disolverse en agua (OMS, 2018).

2.5. Contacto con arsénico

Debido a que el arsénico se encuentra naturalmente en el ambiente, se está expuesto a cierta cantidad de este mismo a través de los alimentos, el agua potable o del aire. Los métodos de análisis que usan los científicos para determinar los niveles de arsénico en el ambiente generalmente no determinan la forma específica de arsénico presente. Por lo tanto, no siempre sabemos a qué forma de arsénico puede estar expuesta una persona. Asimismo, tampoco sabemos que formas de arsénico están presentes en sitios de residuos peligrosos. Algunas formas de arsénico pueden estar adheridas tan fuertemente a partículas o incrustadas en minerales que no son incorporadas por plantas y animales (OMS, 2018).

La concentración de arsénico en el suelo varía ampliamente, aproximadamente 1 y 40 partes de arsénico por millón de partes de suelo (ppm) con un promedio de 3 a 4 ppm. Sin embargo, los suelos cerca de depósitos geológicos ricos en arsénico, cerca de algunas minas y fundiciones, o en áreas agrícolas donde se usaron plaguicidas con arsénico en el pasado, pueden tener niveles de arsénico mucho más altos. Generalmente, la concentración de arsénico en agua de superficie o subterránea es aproximadamente 1 parte de arsénico por billón de partes de agua (1 ppb), pero puede exceder 1,000 ppb en áreas de minería o donde los niveles de arsénico en el suelo son naturalmente elevados. Generalmente, el agua subterránea contiene niveles de arsénico más altos que el agua de superficie. Estudios del agua potable en Estados Unidos indican que cerca del 80% de los suministros de agua tienen menos de 2 ppb de arsénico, pero 2% de los suministros exceden 20 ppb (OMS, 2018).

Los niveles de arsénico en los alimentos varían entre 20 y 140 ppb. Sin embargo, los niveles de arsénico inorgánico, la forma que genera mayor preocupación, son mucho más bajos. Los niveles de arsénico en el aire generalmente varían entre menos de 1 nanogramo (1 nanogramo es la billonésima parte de 1 gramo) hasta cerca de 2,000 nanogramos de arsénico por metro cúbico de aire (menos de 1 hasta 2,000 ng/m³), dependiendo de la localidad, las condiciones climáticas y el nivel de actividad industrial en el área. No obstante, los niveles de arsénico en áreas urbanas generalmente varían entre 20 y 30 ng/m. Normalmente, cantidades pequeñas de arsénico entran al cuerpo a través del aire y por la ingesta de agua o alimentos contaminados (OMS, 2018).

2.6. Efectos sobre la salud

Desde la antigüedad se sabe que el arsénico es un veneno para el ser humano y dosis altas del mismo pueden ser fatales. Si se ingiere niveles de arsénico más bajos (entre 300 y 30,000 ppb en el agua; 100 a 1,000 veces mayores que la mayoría de los niveles en el agua potable en EE. UU. De acuerdo con la OMS (2018), el arsénico puede provocar irritación del estómago y los intestinos, acompañado de:

- Dolor de estómago.
- Náusea.
- Vómitos.
- Diarrea.

Otros efectos que puede sufrir incluyen:

- Reducción de la producción de glóbulos rojos y blancos.
- Fatiga.
- Ritmo cardíaco anormal.
- Daño de los vasos sanguíneos (lo que produce contusiones).
- Alteraciones de la función de los nervios.

Tal vez el efecto más característico de la exposición oral prolongada a arsénico inorgánico es un cuadro de alteraciones de la piel. Estas incluyen un oscurecimiento de la piel y la aparición de pequeños callos o verrugas en la palma de las manos, la planta de los pies y el torso, a menudo asociados con alteraciones en los vasos sanguíneos de la piel. También se puede desarrollar cáncer de la piel. También se ha observado que la ingesta de arsénico aumenta el riesgo de desarrollar cáncer del hígado, vejiga y pulmones. El Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS) y la EPA han determinado que el arsénico inorgánico es reconocido como sustancia carcinogénica en seres humanos. La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) ha determinado que el arsénico inorgánico es carcinogénico en seres humanos (OMS, 2018).

La entrada de altos niveles de arsénico inorgánico al organismo por vías respiratorias puede causar dolor de garganta e irritación de los pulmones. También se pueden desarrollar algunos de los efectos de la piel descritos anteriormente. El nivel de exposición que produce estos efectos no se conoce con certeza, pero probablemente es más de 100 microgramos de arsénico por metro cúbico de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante una exposición breve. La exposición prolongada a niveles más bajos puede producir efectos de la piel y también desórdenes circulatorios y de los nervios periféricos. Algo que preocupa bastante es la capacidad del arsénico inorgánico que se inhala para aumentar el riesgo de cáncer del pulmón. Esto se ha observado principalmente en trabajadores expuestos al arsénico en fundiciones, minas y en fábricas de productos químicos, aunque también se ha observado en la población civil próxima a fundiciones y de fábricas de productos arsenicales. Las poblaciones aledañas a sitios de desechos que contienen arsénico también pueden correr un riesgo más alto de contraer cáncer del pulmón. Si la

piel entra en contacto directo con compuestos inorgánicos de arsénico, se produciría irritación, enrojecimiento e hinchazón. Sin embargo, parece improbable que el contacto con la piel produzca efectos internos graves (OMS, 2018).

Casi no hay ninguna información acerca de los efectos de los compuestos orgánicos de arsénico en seres humanos. Los estudios en animales indican que la mayoría de los compuestos orgánicos de arsénico simples (por ejemplo, los compuestos de metilo y dimetilo) son menos tóxicos que las formas inorgánicas. En animales, la ingestión de compuestos de metilo puede producir diarrea, y la exposición de por vida puede dañar los riñones. Por otro lado, la exposición de por vida a compuestos de dimetilo puede dañar la vejiga y los riñones (OMS, 2018).

2.7. Toxicidad de las especies de arsénico

El arsénico (As) es considerado dentro de las toxinas esenciales porque se requiere en pequeñas cantidades para el crecimiento y el metabolismo, pero es tóxico en altas concentraciones (Krumova et al., 2008). La toxicidad para los humanos de un compuesto con arsénico depende en gran medida de su forma química, diferenciándose dos grupos de compuestos: inorgánicos y orgánicos. Los compuestos inorgánicos del arsénico son los más tóxicos y aparecen, sobre todo, en aguas, donde se encuentran principalmente en forma de pentóxido de arsénico (As_2O_5) (As V) o trióxido de arsénico (As_2O_3) (As III).

La toxicidad de estos compuestos depende del estado de oxidación, estado físico, solución o tamaño de las partículas de polvo, la velocidad de absorción en las células, la velocidad de eliminación y la solubilidad en el medio biológico. Además, la exposición a compuestos de arsénico inorgánico se ha asociado a diversos tipos de cánceres como de hígado, pulmones y piel, así como a diabetes (Basu et al., 2014). Por otra parte, los compuestos orgánicos de arsénico se encuentran frecuentemente en alimentos y suponen la vía principal de exposición de la población al arsénico (Aragonés, 2001; Ferrer, 2003).

El arsénico III o As III entra en las células a un pH neutro por acuagliceroporinas (proteínas de transporte de glicerol) en bacterias, levaduras y mamíferos, y su toxicidad reside en su capacidad para unirse a los grupos sulfhidrilo de los residuos de cisteína en las proteínas, lo que las inactiva y lo hace altamente tóxico. También actúa como disruptor endócrino mediante la unión a receptores hormonales e interfiere con la señalización de las células (Santini y vanden Hoven, 2004; Krumova et al., 2008; Tsai et al., 2009). Por su parte, la toxicidad del Arsénico V o As V se debe principalmente a que puede sustituir al fosfato, pues posee una estructura análoga y, por consiguiente, puede inhibir la fosforilación oxidativa y entrar a las células a través del sistema de transporte del fosfato (Santini y vanden Hoven, 2004; Tsai et al., 2009; Rosen et al., 2011).

2.8. Arsénico en aguas subterráneas

Aunque la mayor parte del arsénico (As) que encontramos en las aguas es de origen natural y, así mismo, el arsénico proveniente de la actividad antropogénica. Aun así, el origen del arsénico no determina su toxicidad, sino que ésta está determinada por la especie o grado de oxidación en el que el arsénico se encuentre. Aspecto mencionado con anterioridad en el apartado previo. A pesar de los riesgos y de la toxicidad del arsénico ha sido utilizado frecuentemente a lo largo de los años en grandes cantidades y sin ningún tipo de control, esto se presenta en distintos sectores industriales, entre estos la producción de plaguicidas, pinturas, imprenta, medicina, entre otras actividades.

Es importante abordar el ciclo del arsénico tanto el de origen natural como antropogénico. Como ya se ha mencionado, el arsénico que forma parte del sedimento y las rocas, y son el punto de partida de éste ciclo, se disuelve en el agua llegando a ríos y océanos de manera natural o bien el hombre lo extrae con fines industriales, llegando igualmente a dichos cuerpos de agua, donde éste entra en los ciclos vitales de los organismos vivos, y de ahí va a la atmósfera. Así como el origen prevalente del arsénico presente en el agua es el natural, en el caso del arsénico presente en la atmósfera, juegan un papel muy importante las emisiones humanas de arsénico a partir de chimeneas, pinturas, pulverización de pesticida y riego de suelos áridos con agua cargada de As. Uno de los impactos derivados de la extracción humana de As de suelos y minas para fines industriales crea una rotura del ciclo de éste mismo, a la vez que una nueva incorporación al ciclo en grandes cantidades.

Una de las razones para la inclusión de este apartado se debe a la presencia de arsénico en aguas subterráneas, concretamente acuicludos, de la zona perteneciente a la empresa del caso de estudio. De acuerdo con Jonhson (1967) los acuicludos, son formaciones geológicas que contiene agua en cantidad apreciable y que no permite que el agua circule a través de ella. Adjunto a lo anterior, el promovente manifestó la presencia de acuicludos contaminados con arsénico, en la siguiente tabla se pueden apreciar los resultados del muestreo.

Tabla 1. Muestreo de caracterización de agua en acuicludos. Fuente: SEMARNAT, 2019.

ID	Dilución del Método	Dilución requerida	LC	Resultado mg/L
PMIQAs-01	1.0	200	0.001	0.308
PMIQAs-02	1.0	1000	0.001	1,152
PMIQAs-03	1.0	1000	0.001	2,457
PMIQAs-04	1.0	1000	0.001	3,457
PMIQAs-05	1.0	10000	0.001	33,236
PMIQAs-06	1.0	4000	0.001	16,555

Con estos datos podemos afirmar la presencia de una alta concentración de arsénico en las aguas contenidas en los acuicludos, teniendo detecciones que van desde 1,000 hasta 30,000 mg/L, lo cual implica que existe contaminación por arsénico en dichos cuerpos.

2.9. Arsénico en el medio ambiente

Como ya se ha mencionado, el arsénico puede ser transportado por aire, agua y suelo a través de la volatilización de polvo y la movilización de aguas de escorrentía, por lo que la contaminación por arsénico está muy extendida debido a su fácil dispersión (Emsley, 2001; Gillispie et al., 2015). Cuando hay mayor presencia geológica natural de arsénico, se pueden encontrar altos niveles en aguas subterráneas, como es el caso de Bangladesh, India, China, Taiwán, Mongolia, Chile, Argentina, México y numerosos lugares de Estados Unidos de Norteamérica (Anawar et al., 2003; Mondal et al., 2006; Campos et al., 2007). Las principales fuentes de contaminación de arsénico por causa humana son la quema de carbón y la fundición de metales industriales y, más recientemente, la industria de semiconductores y la liberación de minerales ricos en arsénico durante la extracción minera de otros compuestos (Mukhopadhyay et al., 2002).

La contaminación de aguas subterráneas por arsénico es una grave amenaza, ya que el arsénico puede incorporarse fácilmente en la cadena alimenticia y favorecer su distribución de amplia difusión en todo el reino animal y vegetal (Mandal y Suzuki, 2002; Rakib y Bhuiyan, 2014). Dependiendo de las condiciones físicoquímicas del medio ambiente, algunos compuestos de arsénico se pueden solubilizar fácilmente en agua y, de ahí, ser tomados por los microorganismos, dando lugar a altos niveles de biodisponibilidad (Tsai et al., 2009). Debido a su toxicidad, la Organización Mundial de la Salud (OMS) considera perjudicial para el ser humano el consumo de agua con una concentración de arsénico superior a 10 mg L⁻¹. Este metaloide también ocupa el primer

lugar en la lista de productos contaminantes de agua de la Agencia de Protección Ambiental (EPA), por lo que en 2006 se redujo en Estados Unidos la concentración de arsénico en agua potable de 50 mg L⁻¹ a 10 mg L⁻¹ (WHO, 2003; EPA, 2006).

2.10. Normatividad aplicable al caso

En México, se dispone de las siguientes Normas para Límites Máximos Permisibles para arsénico en agua y suelo. La Norma Oficial Mexicana 127 (NOM-127-SSA1-1994) donde se establecen los límites permisibles de calidad del agua para uso y consumo humano que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados, siendo 25 mg L⁻¹ la concentración límite de arsénico en el agua potable según Norma Mexicana modificada en 2000 (NOM-127-SSA1-1994). Por otra parte, en la Norma Oficial Mexicana 147 (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) se establece la concentración límite de arsénico para suelo de uso industrial, siendo ésta de 260 mg kg.

NOM-127-SSA1-1994: Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características microbiológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas, con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor.

Por tales razones la Secretaría de Salud, propone la modificación a la presente Norma Oficial Mexicana, con la finalidad de establecer un eficaz control sanitario del agua que se somete a tratamientos de potabilización a efecto de hacerla apta para uso y consumo humano, acorde a las necesidades actuales.

NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.

El desarrollo de actividades económicas de manera no sustentable ha contribuido a la emisión de compuestos potencialmente tóxicos que, bajo ciertas condiciones y concentraciones, pueden tener efectos nocivos a la salud de la población y afectaciones al equilibrio ecológico y el ambiente.

Con la información del modelo conceptual, el responsable puede seleccionar entre cuatro opciones para establecer, una vez determinada la existencia de contaminación, la concentración objetivo de remediación:

- 1) Remediar hasta las concentraciones de referencia totales establecidas en la Tabla 1. Estas concentraciones se obtuvieron de la literatura internacional, en

estudios realizados con base en la metodología de evaluación de riesgo a la salud, para evaluar y remediar sitios contaminados. En el cálculo se emplearon valores de toxicidad con factores de exposición estándar. Estas concentraciones de referencia que se consideran protegen al ser humano, se basan en rutas de exposición directas para las cuales se han desarrollado métodos, modelos y supuestos específicos, bajo condiciones particulares de uso de suelo y no consideran impactos al acuífero o ecológicos.

2) Remediar hasta las concentraciones de fondo. Para ello se obtendrá el valor de las concentraciones de los elementos normados que se encuentran de manera natural en el sitio o su entorno.

3) Remediar hasta concentraciones específicas totales. Aplicable cuando existe población humana potencialmente expuesta a algún(os) contaminante(s). Para su obtención se debe determinar el riesgo a la salud y al ambiente.

4) Remediar hasta las concentraciones de referencia de la fracción soluble establecidas en la siguiente tabla:

Tabla 2. Concentraciones de referencia totales (CRT) por uso de suelo. Fuente: SEMARNAT, 2004.

Contaminante	Uso agrícola/residencial/comercial (mg/kg)	Uso industrial (mg/kg)
Arsénico	22	260
Bario	5,400	67,000
Berilio	150	1,900
Cadmio	37	450
Cromo Hexavalente	280	510
Mercurio	23	310
Níquel	1,600	20,000
Plata	390	5,100
Plomo	400	800
Selenio	390	5,100
Talio	52	67
Vanadio	78	1,000

NOM-159-SEMARNAT-2011, Que establece los requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre.

La lixiviación de minerales es uno de los métodos que se utilizan para la extracción de mineral de cobre. Los aspectos de control ambiental a considerar en la operación de un sistema de lixiviación se asocian con el potencial de generación de drenaje ácido y la movilidad de metales del mineral lixiviado, así como con la pérdida de estabilidad de la pila.

A nivel internacional son reconocidos los efectos ambientales que se pueden generar debido al inadecuado manejo de este tipo de beneficio de minerales. Los impactos ambientales pueden ser significativamente minimizados a través de la aplicación de las mejores tecnologías ambientales que permitan el adecuado proyecto, construcción, operación y disminución de la toxicidad de las instalaciones; así como de prácticas para el cierre definitivo y la rehabilitación de todas las áreas.

2.11. Técnicas para el tratamiento de arsénico en el caso de estudio

En cuanto a la técnica empleada para el tratamiento de suelo contaminado con arsénico, el promovente entregó información relacionada con el método de solidificación/estabilización, cabe recalcar que se trata de un procedimiento poco común, y como ya se ha mencionado anteriormente, pues en la actualidad existen tres empresas en México autorizadas para su aplicación. De este mismo, se puede obtener la siguiente información.

2.12. Método de Solidificación/Estabilización (S/E)

De acuerdo con la EPA (2003), el método de solidificación/estabilización se refiere a un grupo de técnicas de limpieza que evitan o reducen la liberación de químicos nocivos del suelo o lodo contaminado. En general, estos métodos no destruyen los químicos, sino que protegen la salud humana y el medio ambiente al impedir que los químicos o contaminantes ubicados en el sitio, se desprendan hacia el medio ambiente. La solidificación es un proceso que liga el suelo o lodo contaminado para llevarlo a un estado sólido. La estabilización, por su parte, modifica los químicos para tornarlos menos nocivos o volátiles. A menudo se usan estos dos métodos en forma conjunta a fin de prevenir el contacto de químicos nocivos con personas o el medio ambiente.

La solidificación consiste en mezclar suelo contaminado con una sustancia, como el cemento, que provoca el endurecimiento del suelo. La mezcla forma un sólido que puede dejarse en el lugar o transportarse a otro sitio. El proceso de solidificación impide que el químico se disperse en el medio ambiente circundante. El agua de lluvia u otras fuentes no puede disolver los químicos al atravesar el suelo o lodo tratado. La solidificación no elimina los químicos nocivos, sino que los atrapa en el lugar. La estabilización convierte a los químicos nocivos en sustancias menos dañinas o móviles. Por ejemplo, el suelo contaminado con metales puede mezclarse con cal o cemento. Estos materiales de

limpieza reaccionan con los metales para formar compuestos metálicos menos solubles. Estos compuestos metálicos no se mueven a través del suelo ni salen de él con tanta facilidad (EPA et al, 2003).

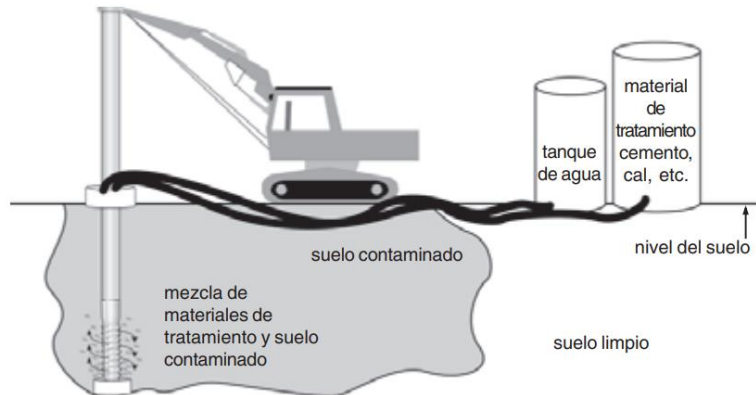


Figura 1. Esquema de la aplicación del método de Solidificación/Estabilización. Fuente: EPA, 2003.

Además, cabe mencionar que la solidificación/estabilización es una manera relativamente rápida y de bajo costo de proteger la salud humana y el medio ambiente de la amenaza que acarrearán los químicos nocivos, en especial los metales (EPA, 2003).

2.13. Aspectos técnicos del método de Solidificación/Estabilización

El método de S/E, como ya se ha mencionado, se trata de un proceso de tratamiento químico que busca la consolidación de compuestos o flujo de los residuos peligrosos, de tal modo que estos no tengan un impacto en el ambiente y en la salud (EPA, 2003). Es importante, antes de iniciar con la aplicación del método, conocer las propiedades físicas y químicas del suelo y entender los mecanismos de interacción entre estos y los contaminantes. Las partículas del suelo interactúan con los contaminantes mediante tres mecanismos (Asavapisit, 1997) dependiendo de sus características:

- **Sorción (adsorción física o química)**

La **adsorción** es una de las operaciones más utilizadas en la etapa de concentración de soluciones acuosas diluidas. Mediante la adsorción, las moléculas de un soluto se concentran en una superficie sólida por la acción de fuerzas intermoleculares entre el soluto y el sólido (Tejeda y col., 1995).

- **Reacciones de complejación**

La **complejación** es una reacción que resulta en la formación de un compuesto de Coordinación o Complejo, el cual se forma cuando un ión metálico reacciona formando enlaces con una especie dadora de, al menos, un par de electrones denominados como ligando. Estos últimos se disponen alrededor del ión metálico, formando una “esfera de coordinación” de geometría definida, con una cantidad de ligandos que se encuentra limitada por el número de Coordinación de ión metálico (Gary D., 1995).

- **Precipitación (formación de hidróxidos insolubles)**

La **precipitación química** es un proceso por el cual una sustancia soluble se convierte en insoluble ya sea por una reacción química o por cambios en la composición del solvente para disminuir la solubilidad de las sustancias en él. Los sólidos precipitados pueden separarse por sedimentación y/o filtración. Se usa comúnmente para reducir la dureza del agua por remoción de calcio y magnesio. En el tratamiento de residuos peligrosos, el proceso tiene una amplia aplicación para la remoción de metales tóxicos de residuos acuosos (Chung. 1989).

De acuerdo con (Santanu, 2006), la estabilización de los metales pesados se logra convirtiendo los metales en precipitados insolubles o mediante la interacción entre los iones metálicos y los productos de hidratación del cemento. La inmovilización de los contaminantes en el proceso de S/E da por tres mecanismos dependiendo de su naturaleza:

- **Fijación química:** La fijación química es un proceso a través del cual se detoxifica, inmoviliza, insolubiliza o se reduce la peligrosidad de un residuo. Se logra este efecto generalmente a través de una reacción química entre uno o más componentes del residuo y una matriz sólida (Gary D.,1995). En este caso, mediante interacciones entre los contaminantes y los productos de hidratación del cemento.
- **Adsorción física** de los contaminantes en la superficie de los productos de hidratación del cemento (Tejeda y col., 1995).
- **Encapsulación física** del residuo o suelo contaminado El encapsulamiento se lleva a cabo teniendo en cuenta los procesos de solidificación y estabilización (S/E), que tienen como objetivo limitar la solubilidad o movilidad de un contaminante presente en el suelo, disminuyendo así su toxicidad o eliminando su lixiviación (Volke et al., 2005).

2.14. Agentes utilizados en el proceso de Solidificación/Estabilización

Los sistemas de S/E se tipifican de acuerdo con los agentes enlazantes y estabilizantes. Los agentes que contribuyen a un incremento de la resistencia asociado con la estabilización se denominan enlazantes o solidificantes; así mismo, los agentes que retienen los contaminantes en una matriz frecuentemente son denominados como sorbentes, precipitantes o estabilizantes (Castro, 2000). De acuerdo con la Tabla 3, se pueden apreciar algunas de las sustancias como las siguientes:

Tabla 3. Agentes solidificantes y estabilizantes en sistemas S/E empleados en suelos contaminados. Fuente: Castro, et. al.

Solidificantes	Estabilizantes
Cemento Portland	Silicatos Solubles (NaSiO, KSiO)
Ceniza volante	Bentonita
Polvo de Kiln	Vermiculita
Arcillas	Lignosulfato de sodio o calcio
Cemento Portland/Cal	Aluminato de calcio
Sulfoaluminato de calcio	Acetato polivinilo/Estearato de aluminio
Polvo de filtro/Ceniza/Cemento	Bicarbonato de sodio
Cal/Arcilla	Alcohol polivinílico
Cal/Ceniza volante	Sulfato, cloruro o hidróxido de calcio
Cal/Polvo de Kiln	Cal (Óxido de calcio)

2.15. Mecanismos

Los mecanismos que tienen lugar en el proceso de S/E son tanto físicos como químicos. La distinción entre los procesos se suele hacer atendiendo a la escala a la que tienen lugar. De este modo, los procesos de inmovilización química ocurren a escala atómica, ya que requiere de una reacción química para que el proceso tenga lugar y los de inmovilización física a una escala mayor, ya que operan absorbiendo o adsorbiendo los constituyentes peligrosos del medio ambiente (Conner, 1998), la descripción de estos mismos se proporciona en el apartado de **Aspectos técnicos del método de Solidificación/Estabilización** del **Capítulo II** de **Marco Teórico**.

El fundamento de los mecanismos de S/E es muy diferente para residuos con constituyentes tóxicos orgánicos e inorgánicos (principalmente metales). En el caso de metales, consisten principalmente en convertir al metal pesado en precipitados insolubles. Así mismo, dichos mecanismos incluyen precipitación, coprecipitación y/o formación de complejos. Los factores que mayor influencia tienen en estos procesos son el pH y el potencial redox (Conner et al., 1998). Modificando estos factores, se puede convertir al metal pesado en especies menos solubles, como hidróxidos o sulfuros. En el caso de tóxicos orgánicos, ya que numerosos compuestos orgánicos no reaccionan con aglomerantes inorgánicos debido a su naturaleza apolar e hidrófoba. Posteriormente, se procede adsorbiéndolos o encapsulándolos en poros, lixiviando en función de la solubilidad en agua y su movilidad a través de la matriz (Hebatpuria, 1999).

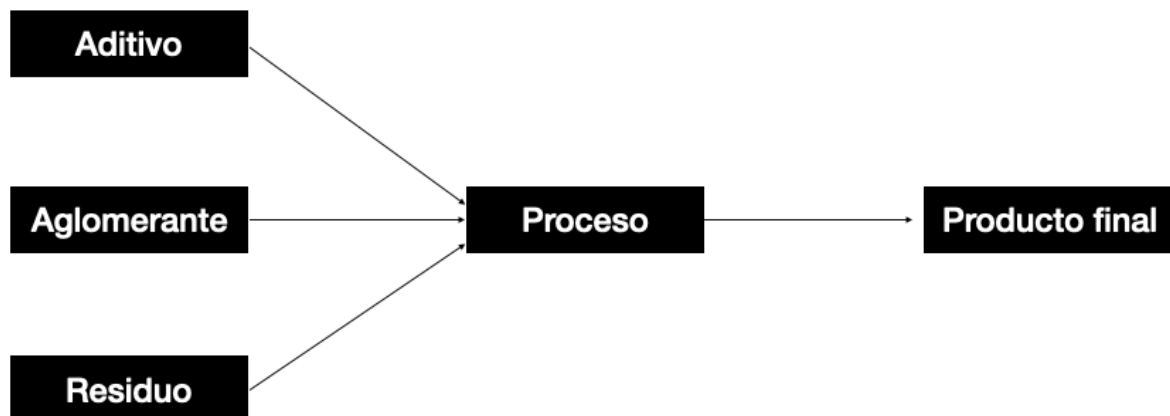


Figura 2. Diagrama de bloques del método de Solidificación/Estabilización. Fuente: Pérez, 2016.

2.16. Cemento Portland

De acuerdo con Hills, 2007, el cemento Portland es un producto artificial resultante de calcinar hasta un principio de fusión mezclas rigurosamente homogéneas de caliza y arcilla obteniéndose un cuerpo llamado *Clinker*, constituido por silicatos y aluminatos anhidros, el cual hay que pulverizar junto con yeso, para retardar su fraguado. Este mismo, es un conglomerante hidráulico que, amasado en agua forma una pasta que fragua y endurece, y, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua (Hills et al, 2007).

Además, es moldeable, resistente y duradero. Su principal propiedad es la de formar masas pétreas resistentes y duraderas cuando se lo mezcla con áridos y agua. El endurecimiento de la mezcla ocurre en cierto tiempo después del amasado, permitiendo, por lo tanto, moldear el producto resultante (Hills et al, 2007).

2.17. Una mirada a la química del cemento Portland

El proceso de hidratación del cemento Portland es una secuencia de reacciones simultáneas que se producen entre los compuestos anhidros y el agua. No todos los componentes se hidratan a la misma velocidad y la presencia de algunos adicionales puede modificar estas reacciones y su cinética.

Cuando el cemento Portland se mezcla con agua se obtiene un producto de características plásticas con propiedades adherentes que solidifica en algunas horas y endurece progresivamente durante un período de varias semanas hasta adquirir su resistencia característica. El endurecimiento inicial es producido por la reacción del agua,

yeso y aluminato tricálcico, formando una estructura cristalina de calcio-aluminio-hidrato, estringita y monosulfato.

El sucesivo endurecimiento y el desarrollo de fuerzas internas de tensión derivan de la reacción más lenta del agua con el silicato tricálcico formando una estructura amorfa llamada calcio-silicato-hidrato. En ambos casos, las estructuras que se forman envuelven y fijan los granos de los materiales presentes en la mezcla. Una última reacción produce el gel de sílice (SiO_2). Las tres reacciones generan calor.

Las reacciones de hidratación, que forman el proceso de fraguado son:



Estas reacciones son todas **exotérmicas**. La hidratación de CaOAl_2O_3 , seguida de la de CaOSiO_2 , y luego $\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ y finalmente CaOSiO_2 .

2.18. Componentes del cemento Portland

Tabla 4. Composición del cemento Portland. Fuente: Hills et al 2007.

Nombre	Formula	Abreviatura	Formula de óxidos	Porcentaje
Silicato tricálcico	Ca_2SiO_4	C_3S	$\text{SiO}_2 - 2\text{CaO}$	32%
Silicato dicálcico	Ca_3SiO_5	C_2S	$\text{SiO}_2 - 3\text{CaO}$	40%
Aluminato tricálcico	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	C_3A	$\text{Al}_2\text{O}_3 - 3\text{CaO}$	10%

Ferroaluminato tetracálcico	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	C_4AF	$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ Fe}_2\text{O}_3$ 4CaO	9%
Sulfato de calcio	CaSO_4			2-3%

2.19. Factores que afectan la selección y realización de los procesos de S/E

Los factores que afectan a la selección, diseño, realización y rendimiento de los procesos de S/E son: las características del residuo, tipo de proceso y necesidades del tratamiento, destino final del producto obtenido, requerimientos legales y aspectos económicos. Estos factores y otros más específicos como la localización, clima, hidrología, entre otros; deben considerarse para asegurar un buen rendimiento de los procesos (Pérez, 2016).

Componente	Propiedades
C_3S Silicato tricálcico	Se hidrata y endurece rápidamente, es responsable en gran medida del fraguado inicial y de la resistencia temprana. En general la resistencia temprana del concreto de cemento Portland es mayor con porcentajes superiores de C_3S .
C_2S Silicato dicálcico	Se hidrata y endurece lentamente; contribuye en gran parte al incremento de resistencia a edades mayores de una semana.

C₃A Aluminato tricálcico	Libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento. También contribuye levemente al desarrollo de la resistencia temprana. El yeso, que se agrega al cemento durante la molienda final, retrasa la velocidad de hidratación del C₃A. Sin el yeso, un cemento que contuviera C₃A fraguaría rápidamente. Los cementos con bajos porcentajes de C₃A son particularmente resistentes a los suelos y aguas que contienen sulfatos.
C₄AF Ferroaluminato tetracálcico	Reduce la temperatura de formación del <i>clinker</i>, ayudando por tanto a la manufactura del cemento. Se hidrata con cierta rapidez, pero contribuye mínimamente a la resistencia. La mayoría de los efectos de color se debe al C₄AF y sus hidratos.

2.20. Características de residuo

Este es uno de los factores que más afecta a las tecnologías S/E, debido a que hay que tener en cuenta las propiedades del residuo tales como peligrosidad, propiedades físicas y químicas, manejo de este y procedencia (Pérez, 2016).

En principio, los residuos inflamables, corrosivos, reactivos e infecciosos están entre los que deben ser considerados para solidificación sin alguna forma de pretratamiento. Los principales factores físicos del residuo que afectan a la solidificación son los siguientes: forma y tamaño de las partículas, viscosidad, humedad, densidad, contenido de agua libre, contenido de sólidos (Pérez et al, 2016).

En cuanto a los factores químicos, pequeñas cantidades de algunos compuestos pueden reducir la resistencia y características de compactación de la mezcla de aglomerante-residuo. Algunos compuestos residuales actúan como aceleradores o retardadores y pueden causar un comportamiento negativo en este tipo de procesos cuando están en la mezcla. Generalmente los compuestos inorgánicos son más fáciles de estabilizar con éxito que los orgánicos (Pérez et al, 2016).

2.21. Objetivos del tratamiento

En la evaluación y selección de las técnicas de S/E se deben considerar tanto el objetivo del tratamiento del residuo, como los criterios utilizados para determinar el grado de cumplimiento de dichos objetivos por parte del proceso seleccionado (Pérez et al, 2016). En principio se pueden distinguir tres niveles en el tratamiento de residuos peligrosos mediante técnicas de S/E (Pérez et al, 2016):

2.22. Tipos de procesos y necesidades del tratamiento

El tipo de proceso de S/E necesario (en contenedores, en planta fija, in situ, en plantas móviles, entre otros) y las necesidades específicas del tratamiento (pretratamiento, formas de mezcla, transporte del residuo solidificado, deposición del residuo y almacenamiento) son factores importantes para evaluar las diferentes tecnologías. Es más fácil controlar y mejorar la mezcla de la matriz residuo-aglomerante en un reactor o en un proceso en planta que solidificar *in situ* de fosos, estanques o lagunas (Pérez et al, 2016).

También deberán tenerse en cuenta algunos aspectos ligados al tipo de tratamiento elegido tales como son los sistemas de alimentación, manejo, mezclado y bombeo de corrientes residuales y materias primas, los tiempos de tratamiento, compactación y curados necesarios y las variaciones de volumen entre el producto residual inicial y final (Pérez et al, 2016).

2.22.1. Destino final del producto S/E

El destino final del producto y su manejo son importantes a la hora de elegir la tecnología. Dependiendo de las legislaciones existentes y del tipo de vertedero a utilizar, el residuo puede requerir diferentes grados de solidificación o diferentes características finales (Pérez et al, 2016).

2.22.2. Aspectos económicos

El coste es, en general, el factor que determina la elección de un proceso de tratamiento. Normalmente los costes de los procesos de S/E se consideran bajos respecto a otras técnicas de tratamiento, debido a la posibilidad de utilizar materias primas baratas, o incluso subproductos residuales, unos tratamientos sencillos y equipos parecidos a los

tratamientos sencillos y equipos parecidos a los utilizados en el sector de la construcción (Pérez et al, 2016).

Resulta difícil proporcionar un análisis económico exacto de las técnicas de S/E, porque en muchos casos los costes finales dependerán de condiciones específicas de cada lugar. Sin embargo, se pueden considerar el transporte, tipo de proceso y forma de ejecución, los agentes aglomerantes y reactivos, el equipo y construcciones propias, las etapas de pretratamiento, las necesidades de servicios y energía, los requerimientos de espacio y otras consideraciones laborales e ingenieriles generales (Pérez et al, 2016).

2.23. Factores que considerar para la disposición de residuos estabilizados con cemento

Los residuos tóxicos estabilizados con cemento forman un material artificial y heterogéneo, formado por cuatro elementos: cemento, agua, arena y grava. Los dos primeros forman la pasta o material aglutinante, en tanto que los dos últimos se llaman agregados. Al igual que el concreto, los residuos estabilizados con cemento pueden reaccionar a la misma forma a las condiciones a las que es sometido (Jauregui, 2006).

El concreto se usa bajo todas las condiciones climáticas y otras exposiciones naturales, además de ambientes agresivos producidos por el hombre, y que puede estar sujeto a un ataque químico corrosivo (Jauregui et al, 2006).

2.23.1. Acción física

Los efectos de los factores físicos sobre la durabilidad del concreto son críticos en áreas donde hay variaciones extremas de la temperatura y humedad. La mayoría de estos factores son agentes naturales, aunque también pueden ser producidas por el hombre. El principal daño físico es el cambio de volumen dentro del concreto expuesto a la humedad, fluctuaciones de temperatura, contracción y expansión debido a los agregados reactivos (Jauregui et al, 2006).

Una de las manifestaciones visuales de daño físico es el agrietamiento del concreto. A pesar de que inicialmente tal agrietamiento puede no ser perjudicial seriamente al concreto, puede producir deterioro en el concreto a causa de la intemperización y de la penetración de humedad.

2.23.2. Agentes químicos

El concreto endurecido puede ser afectado, en determinadas circunstancias, por diversos procesos que involucran reacciones químicas. Algunas de ellas se presentan en su interior, o son proporcionadas por agentes externos contenidos en el medio que le rodea. El ataque de agentes agresivos externos, también conocido como corrosión química del concreto, puede ser de dos clases principales (Jauregui et al, 2006).

2.23.3. Ataque por disolución

El fenómeno de disolución o deslave del concreto consiste en la remoción paulatina del hidróxido de calcio que se libera durante la hidratación del cemento, como resultado de la acción disolvente del agua que se encuentra en contacto con el concreto. Aun cuando el hidróxido de calcio es soluble en cualquier clase de agua, y lo es más en aguas muy puras (ávidas de sales) o en aquellas que por su contenido de CO_2 , tiene carácter ácido (Jauregui et al, 2006).

Existen dos medios de protección contra esta clase de ataque, impedir que se forme hidróxido de calcio durante la hidratación del cemento, y evitar la penetración del agua agresiva a través del concreto. Lo primero puede conseguirse con el empleo de un cemento especial, aluminoso, de escoria de alto horno o puzolánico. Para lo segundo, si la agresividad del medio es baja, es suficiente la fabricación de un concreto muy denso, compactado e impermeable, pero cuando la solución es muy agresiva, debe recurrirse a una protección adicional (Jauregui et al, 2006).

2.23.4. Ataque por descomposición química

Existen algunas sustancias cuya agresividad al concreto es consecuencia de su reacción química con algunos compuestos del cemento. Como frecuentemente el producto de la reacción ocupa mayor volumen que los compuestos que reaccionan, el efecto resultante es una expansión interna que tiende a provocar la desintegración del concreto (Jauregui et al, 2006).

Entre este tipo de agentes agresivos destacan por sus efectos algunas sales de ácidos inorgánicos, como los sulfatos y cloruros, cuya frecuencia en zonas pantanosas es frecuentemente. Se observa que las sales más agresivas son los sulfatos, de ahí que la acción química de sales inorgánicas se conozca genéricamente como ataque por sulfatos.

CAPÍTULO III

Metodología

3.1. Metodología

Con la finalidad de llevar a efecto el objetivo general y objetivos particulares del proyecto, se establecen dos vías de acción enfocadas en los apartados teórico, referentes a los aspectos base del procedimiento que se aplicó para la remediación del suelo, asimismo la normativa y legislación aplicable al caso, enfocado a los aspectos técnicos y experimentales del caso. Dicho esto, se presentan los siguientes diagramas:

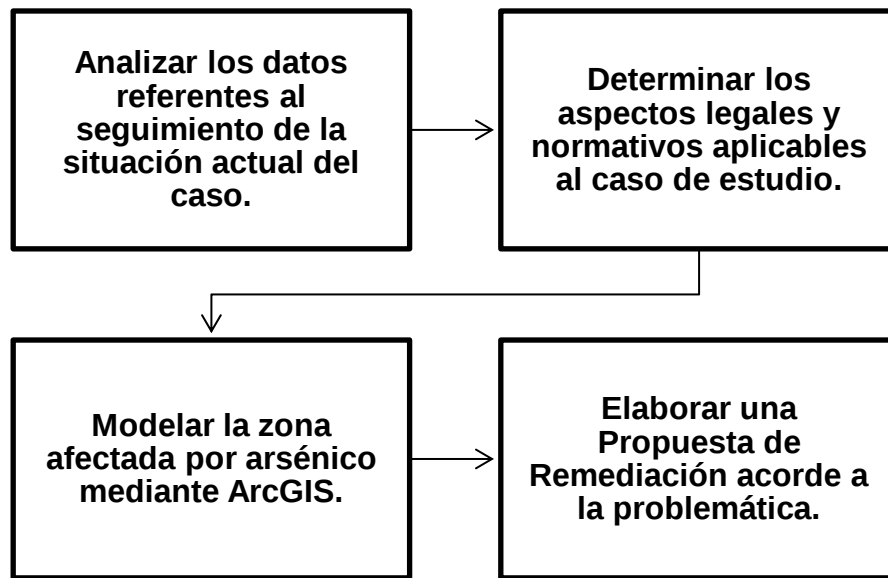


Figura 3. Metodología teórica del proyecto. Fuente: Elaboración Propia.

3.2. Analizar los datos referentes al seguimiento de la situación actual del caso

En esta fase metodológica, se analizó la información referente al caso de estudios en poder de la secretaría. A continuación, se presenta un resumen de los sucesos que dieron lugar al caso de estudio y el estado actual del mismo:

- La información del caso en turno hace referencia al impacto ambiental provocado al suelo por la fuga de sustancias almacenadas, dentro de los límites de un lote industrial, ubicado en el Estado de México. Concretamente, el contaminante vertido en el suelo fue arsénico, el cual logro infiltrarse varios metros a través del suelo. Dicho lo anterior, al haber acuicludos en el subsuelo, la DGGIMAR planteo la posibilidad de que dichos cuerpos de agua fuesen contaminados en el proceso de infiltración del contaminante.
- Una vez que el promovente envió la información a la DGGIMAR y posterior a la revisión del caso, se procedió a iniciar con el proceso de registro de este. A continuación, se realizó el levantamiento y el muestreo del sitio contaminado para comprobar el alcance de la infiltración de arsénico en el subsuelo.
- Gracias al muestreo, se logró comprobar la infiltración de contaminante a varios metros. En función de esto se procedió a planificar el tipo de remediación en función del impacto generado, para lo cual se eligió el método de Sedimentación/Estabilización.
- Según explican algunos informes referentes al tipo de remediación empleada, se presentaron inconvenientes e interrupciones durante el proceso de aplicación y fraguado del concreto. Dicho esto, no se obtuvieron los resultados esperados, por lo que la contaminación persiste en el sitio.

3.3. Determinar los aspectos legales y normativos aplicables al caso de estudio

Esta fase de la metodología se centra en el análisis contextual de las circunstancias y factores que rodean el caso de estudio, entre dichos factores se encuentran:

- Contaminantes involucrados.
- Sitio donde se produjo el impacto ambiental.
- Condiciones ambientales posteriores al impacto.
- Autoridades con jurisdicción sobre el caso.

Con base en estos factores, es posible determinar cuáles son las leyes y normas aplicables al caso de estudio. Del mismo modo, se pueden plantear parámetros de acción con base en las mismas al momento de llevar a cabo los métodos elegidos para la remediación, además de que estos pueden proporcionar información que servirá de referencia al momento de efectuar el análisis de resultados obtenidos a partir de los métodos de remediación.

Aplicando este aspecto a la situación del sitio de estudio los aspectos legales y normativos y aplicables son:

- *Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) y su reglamento (RLGEEPA).*

Tiene por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para: Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente sano para su desarrollo, salud y bienestar; Definir los principios de la política ambiental y los instrumentos para su aplicación; La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente; La preservación y protección de la biodiversidad, así como el establecimiento y administración de las áreas naturales protegidas.

Asimismo, el aprovechamiento sustentable, la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas; La prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo; Garantizar la participación corresponsable de las personas, en forma individual o colectiva, en la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.

Además del ejercicio de las atribuciones que en materia ambiental corresponde a la Federación, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, bajo el principio de concurrencia previsto en el artículo 73 fracción XXIX de la Constitución; El establecimiento de los mecanismos de coordinación, inducción y concertación entre autoridades, entre éstas y los sectores social y privado, así como con personas y grupos sociales, en materia ambiental, y el establecimiento de medidas de control y de seguridad para garantizar el cumplimiento y la aplicación de esta Ley y de las disposiciones que de ella se deriven, así como para la imposición de las sanciones administrativas y penales que correspondan.

- *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) y su reglamento (RLGPGIR).*

Tiene por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación.

- *La Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004: Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.*

Esta Norma Oficial Mexicana es de observancia obligatoria para todas aquellas personas físicas y morales que deban determinar la contaminación de un suelo con materiales o residuos que contengan arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio, vanadio y sus compuestos inorgánicos.

- *La Norma Oficial Mexicana NOM-053-SEMARNAT-1993: Establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.*

Esta norma oficial mexicana establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

3.4. Modelar la zona afectada por arsénico mediante ArcGIS

Con base en los datos colectados durante el muestreo por la DGGIMAR, se procedió al modelado de la pluma de contaminación empleando el software ArcGIS. El proceso consistió en ubicar el sitio con base en los datos de Google Earth, de la cual se obtuvieron las coordenadas generales de la empresa y de los puntos de muestreo a distintas profundidades.

3.5. Elaborar una Propuesta de Remediación acorde a la problemática

La Propuesta de Remediación será planteada teniendo en mente la Figura 4, que comprende parte de la metodología que se empleará para generar una propuesta que contribuya la correcta implementación del método de Sedimentación/Estabilización.

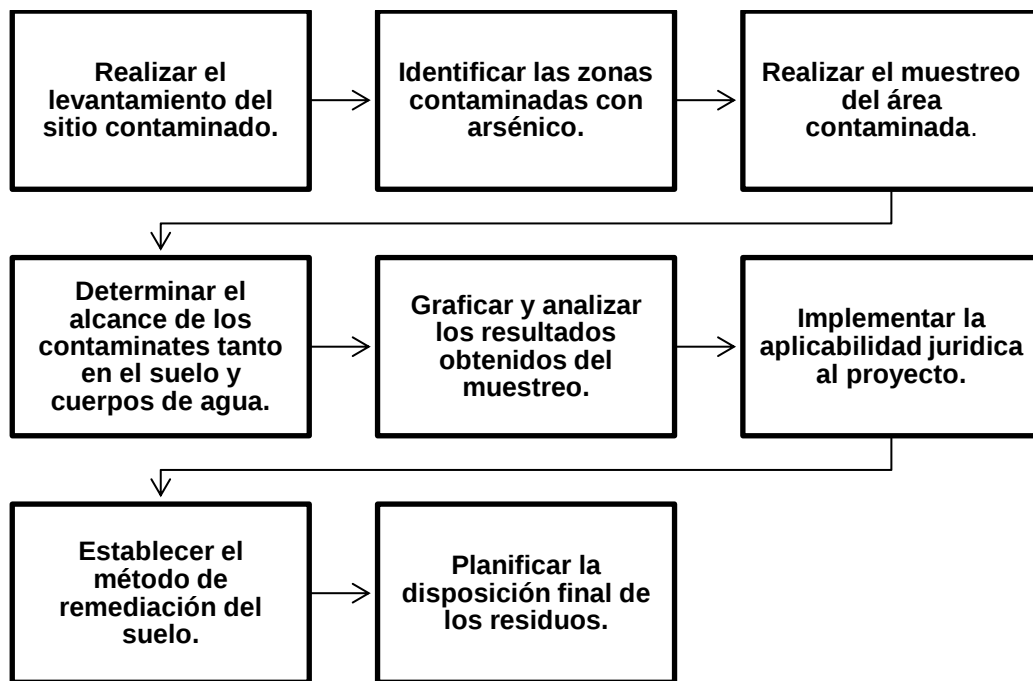


Figura 4. Metodología práctica del proyecto. Fuente: Elaboración Propia.

3.5.1. Realizar el levantamiento del sitio contaminado

Esta fase contempla la visita al sitio de estudio, misma que tendrá el objetivo de comprender el grado de impacto que se ha suscitado. Se realizarán reportes y memorias fotográficas con respecto a los hallazgos.

3.5.2. Identificar las zonas contaminadas con arsénico

En relación con la fase anterior, se localizarán las zonas afectadas por la contaminación haciendo énfasis en las dimensiones de las mismas. Del mismo modo, se efectuarán investigaciones centradas en los registros históricos de las condiciones meteorológicas del municipio/alcaldía, centrados principalmente en la frecuencia de las precipitaciones y sequías. Adicionalmente, se indagará sobre la composición y tipos de suelos presentes en la zona tanto del caso de estudio como de sitios aledaños.

3.5.3. Realizar el muestreo del área contaminada

Con base en los hallazgos resultantes del levantamiento del caso de estudio, se procederá a tomar las muestras de suelo contaminado a distintas profundidades para determinar la concentración y niveles a los que llegaron los contaminantes, en este caso, el arsénico. Asimismo, esta información permitirá comprender la magnitud y extensión del impacto ambiental.

3.5.4. Determinar el alcance de los contaminantes tanto en el suelo y cuerpos de agua

Teniendo en cuenta los resultados del muestreo, se pretende comprender la magnitud y extensión del impacto ambiental provocado por el derrame/fuga de arsénico en el suelo del sitio de estudio y si dicha sustancia alcanzó cuerpos de agua en el subsuelo.

3.5.5. Graficar y analizar los resultados obtenidos del muestreo

Una vez obtenidos los datos del muestreo en la fase anterior, se graficarán los datos a la par de la modelación de la pluma de contaminación. Posteriormente, se realizará el análisis de los resultados para comprender la situación actual del caso de estudio.

3.5.6. Implementar la aplicabilidad jurídica al proyecto

Dicha fase se enfoca en determinar e implementar el marco jurídico aplicable (leyes, reglamentos y normas) a la situación con respecto al impacto ambiental, el tipo de sustancias involucradas, autoridades involucradas, información/datos que deben ser reportados a dichas autoridades y el trámite de admisión del caso para proceder con las medidas mitigatorias o de remediación adecuadas al caso de estudio.

3.5.7. Establecer el método de remediación del suelo

El método de Sedimentación/Estabilización es la opción más viable al caso de estudio, considerando el tipo de contaminantes, suelo, permeabilidad y características particulares en la aplicación de este mismo. Se tomarán en cuenta las carencias e inconvenientes que se presentaron durante la planificación y ejecución por parte del promovente durante la aplicación de dicho método y se establecerán rigurosos controles de supervisión de las actividades, con la finalidad de impedir o minimizar el margen de errores durante y después de la implementación del proceso de S/E.

3.5.8. Planificar la disposición final de los residuos

Debido a la naturaleza de las sustancias que serán encapsuladas por el proceso de S/E, se implementará un plan que contemplará el almacenamiento temporal y traslado a un sitio de disposición final.

Asimismo, se tomará en cuenta la búsqueda de empresas u organizaciones con la capacidad tecnológica y metodológica para tratar dichos residuos.

3.6. Método experimental

En este capítulo se abordará aspectos referentes a la metodología implementada en la técnica de Estabilización/Solidificación realizada para el caso en turno, se acota lo siguiente sobre la experimentación.

El proceso que involucra la técnica de Estabilización/Solidificación requiere caracterización previa del sitio contaminado, esto se realiza con la finalidad de determinar el tipo de contaminante y la profundidad a la que el contaminante pudo acceder durante el incidente relacionado con la contaminación del suelo e inclusive agua subterránea.

La caracterización, en este caso, se llevó a cabo bajo los lineamientos proporcionados por la norma NMX-AA-132-SCFI-2016 para el muestreo e identificación de metales y metaloides, además del manejo de las muestras. Asimismo, la aplicación de la NOM-147-SEMARNAT-2004, la cual establece los criterios para determinar las concentraciones de remediaron de suelos para arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o mercurio. También la NOM-159-SEMARNAT-2011, que establece los requisitos de protección ambiental de sistemas de lixiviación.

3.7. Materiales y métodos

3.7.1. Materiales para el tratamiento de arsénico mediante el fraguado de concreto bentónico

3.7.1.1. Cemento Portland

El cemento portland utilizado es producido comercialmente a partir de clinker y yeso. El cual resistente los sulfatos RS además de poseer resistencia a la compresión 2 máxima de 40 N/mm.

3.7.1.2. Arena

La arena usada es un agregado granular fino de tamaño promedio nominal de 2.1 mm, determinado por prueba de granulometría con tamices, con composición es principal de cuarzo, mica y feldespato. La arena utilizada para es de origen aluvial, sin trituración, libre de polvo, materia orgánica y otras sustancias objetables; y se adquirió en una empresa de materiales de construcción al mayoreo, su denominación comercial es “arena de río”.

3.7.1.3. Grava

La grava usada es obtenida de trituración de roca, con una granulometría en el rango de 12.7 mm a 20.0 mm, con composición principal de minerales de caliza, granito, dolomita, basalto, arenisca, cuarzo y cuarcita. La arena se adquirió en una empresa de materiales de construcción al mayoreo y su nombre comercial es “grava de construcción”.

3.7.1.4. Agua

El agua utilizada para la preparación de soluciones de metales es agua destilada desionizada grado reactivo con especificación de conductividad de 0.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH de 6.5 unidades, sodio y dureza de 0 mg/l. El agua restante requerida para la fabricación de probetas de hormigón es agua potable obtenida de la red de abastecimiento municipal con 0 mg/l de cloro y cumplió la norma NOM-127- SSA1-1994 (2000).

3.7.1.5. Sales metálicas

Los metales del estudio son cromo VI, níquel II y plomo II. Las sales utilizadas para la preparación de las soluciones son sales grado reactivo de trióxido de cromo, cloruro de níquel y nitrato de plomo. La preparación de las soluciones de la Tabla 1 se realiza con sales secas y considerando el grado de hidratación y pureza reportado por fabricante. La formulación del hormigón es en porcentaje de sal para mantener una relación de producción constante, sin embargo, los resultados se expresan en porcentaje de metal en el hormigón para hacer comparativos los resultados.

3.7.1.6. Hormigón

La preparación base de hormigón fue fabricada con cemento portland con una dosificación de materiales para tener una resistencia a la compresión de 29.4 N/mm. La preparación base consistió en cemento portland CPO 18.1%, arena 30.6%, grava 43.2% y agua 8.1%. La cantidad de agua se denomina agua de amasado y es la cantidad máxima de agua permisible; de esta manera se preparan las soluciones de sales metálicas con un máximo del 50% del agua de amasado usando agua potable y el porcentaje restante se incorpora sin metales para tener la matriz de composición que se presenta en la Tabla 1. Los porcentajes de sales son de cada sal en forma independiente y no se probaron interacciones de mezclas de sales.

3.7.1.7. Fabricación de probetas de hormigón

Se fabricaron probetas de hormigón por duplicado, realizando el vaciado manual en capas de 4"; se usó una varilla metálica de acero inoxidable (redondo 5/8" y longitud de 24") para eliminar aire por aplicación 25 golpes por sección, aplicando 3 secciones de hormigón en húmedo ya incluyendo los metales en la solución de amasado. Los moldes usados tienen una proporción de longitud 2:1 y las dimensiones son de 6" de diámetro por 12" de altura. Las probetas están fabricadas de dos medias cañas en acero inoxidable que permanecen unidas por 48 horas y se produce el fraguado de las probetas. Posteriormente se realiza la curación de las probetas dejando reposar en cuarto con humedad controlada hasta el cumplimiento de veinte y ocho días.

3.8. Métodos que considerar para el proceso de S/E

3.8.1. Resistencia a la compression

La determinación de resistencia a la compresión consiste en la determinación de la fuerza que se aplica sobre la superficie circular de las probetas curadas. Los cilindros se someterán, previamente, a la determinación un afinado de la superficie aplicando azufre líquido y dejando enfriar por 10 minutos. La prueba de resistencia a la compresión se realizó por duplicado en un equipo Tinus-Olsen y se determinó la fuerza aplicada hasta que cede la estructura de hormigón, el área se determina por la medición con Vernier de la sección transversal del cilindro de la probeta. La lectura de fuerza se obtuvo en kgf y el área en cm, se calcula la resistencia a la compresión como la fuerza aplicada entre el área y se convierte a unidades de N/mm.

3.8.2. Prueba de lixiviación PECT

La prueba de lixiviación PECT consiste en la extracción en medio ácido de la muestra de hormigón fracturado de la prueba de resistencia a la compresión. La determinación se basa en la NOM-053-SEMARNAT-1993 (2003). El procedimiento consiste en extracción con reactivo de extracción RE1 o RE2 en función del pH. Se selecciona el reactivo de extracción al poner 5 g de muestra sólida con diámetro de 1 mm o menor, con 96.5 ml de agua destilada desionizada y se agita por 5 minutos, si el pH es menor a 5 unidades se utiliza el reactivo de extracción RE1. A un pH superior a 5, se añaden 3.5 ml de HCl 1N se calienta a 50 °C por 10 minutos, se deja enfriar a temperatura ambiente si el pH es menor a 5 unidades se utiliza RE1 o si el pH es superior o igual a 5 unidades se usa RE2.

La prueba de lixiviación se determina con 100 g de muestra sólida con diámetro menor a 1 mm, se agrega el reactivo de extracción correspondiente en proporción de 20 veces el peso de la muestra, la muestra se pone en un matraz Erlenmeyer sellado con película de teflón a una velocidad de agitación de 30 ± 2 rpm, realizado en un agitador orbital y la agitación se mantiene por un tiempo de 18 ± 2 h, tiempo después del cual se realiza un filtrado con un sistema de filtración Kitazato, usando filtro de fibra de vidrio para recolectar el extracto.

El extracto debe de preservarse a 4°C, acidificando con ácido nítrico para un pH inferior a 2 unidades. Los contenedores que vayan a estar en contacto con los extractos para la determinación de metales deberán de ser prelavados con ácido nítrico 1N. El RE-1 se prepara con 5.7 ml de ácido acético glacial adicionados a 500 ml de agua destilada desionizada, se agregan 64.3 ml de NaOH 1N y se afora a 1L, se debe de tener una solución con un pH de 4.93 ± 0.05 . El RE2 se prepara con 5.7 ml de ácido acético glacial y se afora con agua destilada desionizada a 1L, la solución debe tener un pH de 2.88 ± 0.05 unidades. Esta prueba se realiza por duplicado.

3.9. Determinación de metales por absorción atómica

La determinación de metales se realiza por medio de absorción atómica en un equipo Varian SpectrAA 220FS por triplicado, con lámparas de cátodo hueco de un solo elemento y longitudes de onda de 357.9 nm para cromo, 217.0 nm para plomo y 232.0 nm para níquel. Se realizan soluciones para curvas de calibración de concentraciones entre 0.5 a 5.0 mg/l de metal y son almacenadas en refrigeración a 4°C un máximo de 6 meses de acuerdo con la norma NMX-AA-051-SCFI-2001 (2001).

Los tubos de ensayo para almacenamiento de estándares de calibración son fabricados en vidrio de borosilicato y tapa de baquelita. La flama del equipo de absorción atómica se realiza por medio de una mezcla de aire y acetileno. El análisis de metales de los extractos se realiza en una sola determinación y por triplicado en un período máximo de 14 días de acuerdo con la norma NOM-053-SEMARNAT-1993 (2003). El método de

absorción atómica no distingue estados de oxidación por lo que las determinaciones son como cromo, níquel y plomo totales.

Cálculo de eficiencia de retención de metales: El cálculo de la eficiencia de retención se realiza por medio de un balance de materiales para cada uno de los metales y por cada una de las determinaciones (Yilmaz et al., 2003):

$$E_R = \frac{100 (M_{MIH} - M_{ML})}{M_{MIH}}$$

Donde:

E_R = Eficiencia retención de metal en el hormigón (%).

M_{MIH} = Masa de metal incorporada en el hormigón.

M_{ML} = Masa de metal extraída en el lixiviado. El valor de M_{MIH} se obtiene de la cantidad de sal utilizada en la preparación de la Tabla 1 para la muestra específica, corregido a fracción de metal por pureza de la muestra, grado de hidratación y tipo de sal.

El valor de **M_{ML}** se obtiene de la concentración de metal en el lixiviado por muestra expuesta a lixiviación, el valor se corrige a masa total preparada de hormigón.

3.10. Determinación de no-peligrosidad

La determinación de no peligrosidad de una muestra de hormigón se establece si el análisis de metales por absorción atómica de la muestra de lixiviación, posteriormente a las correcciones por dilución y agregado de preservadores tiene valores menores a los presentados en la Tabla 6. De acuerdo con la normativa mexicana se considera una muestra no peligrosa por el criterio de toxicidad.

3.11. Precauciones

La exposición a la toxicidad de los metales pesados es un riesgo durante la experimentación y se tomaron las siguientes medidas de seguridad: durante el manejo de las sales metálicas para preparar las soluciones se usaron guantes de látex, mascarilla respiratoria para partículas y restricción de ventilación para evitar suspensión de partículas; para el amasado y llenado de probetas. Los residuales de materiales de las pruebas de lixiviación PECT y resistencia a la compresión fueron dispuestos para el manejo controlado de residuos.

Tabla 5. Límites máximos permisibles (LMP) para los constituyentes tóxico en el extracto de procedimiento de extracción de constituyentes (PECT) y base seca. Fuente: SEMARNAT, 2011.

Contaminante	LMP (mg/L)	LMP (mg/kg)
	PECT	Base seca
Bario	100.00	2000.00
Cadmio	1.00	20.00
Cromo	5.00	100.00
Plomo	5.00	100.00
Arsénico	5.00	100.00
Selenio	1.00	20.00
Plata	5.00	100.00
Mercurio	0.20	4.00

CAPÍTULO IV

Resultados

4. Modelación de la pluma de contaminación

Referente a las muestras del MFC (Muestreo Final Comprobatorio), entregadas por los laboratorios e instituciones, asimismo por el promovente, se llevó a cabo la modelación de la pluma de contaminación dentro del predio de la zona del caso de estudio. Acudiendo a la recopilación de datos e información disponible, la siguiente figura se sustenta en el MFC para su modelación mediante ArcGIS, como se mencionó en el apartado de **Contaminantes presentes en el sitio del caso de estudio del Capítulo II: Marco Teórico**.

En la siguiente figura se puede apreciar el procedimiento de selección de capas en ArcGIS, las cuales contienen la información de la ubicación y muestreo en el sitio de estudio.

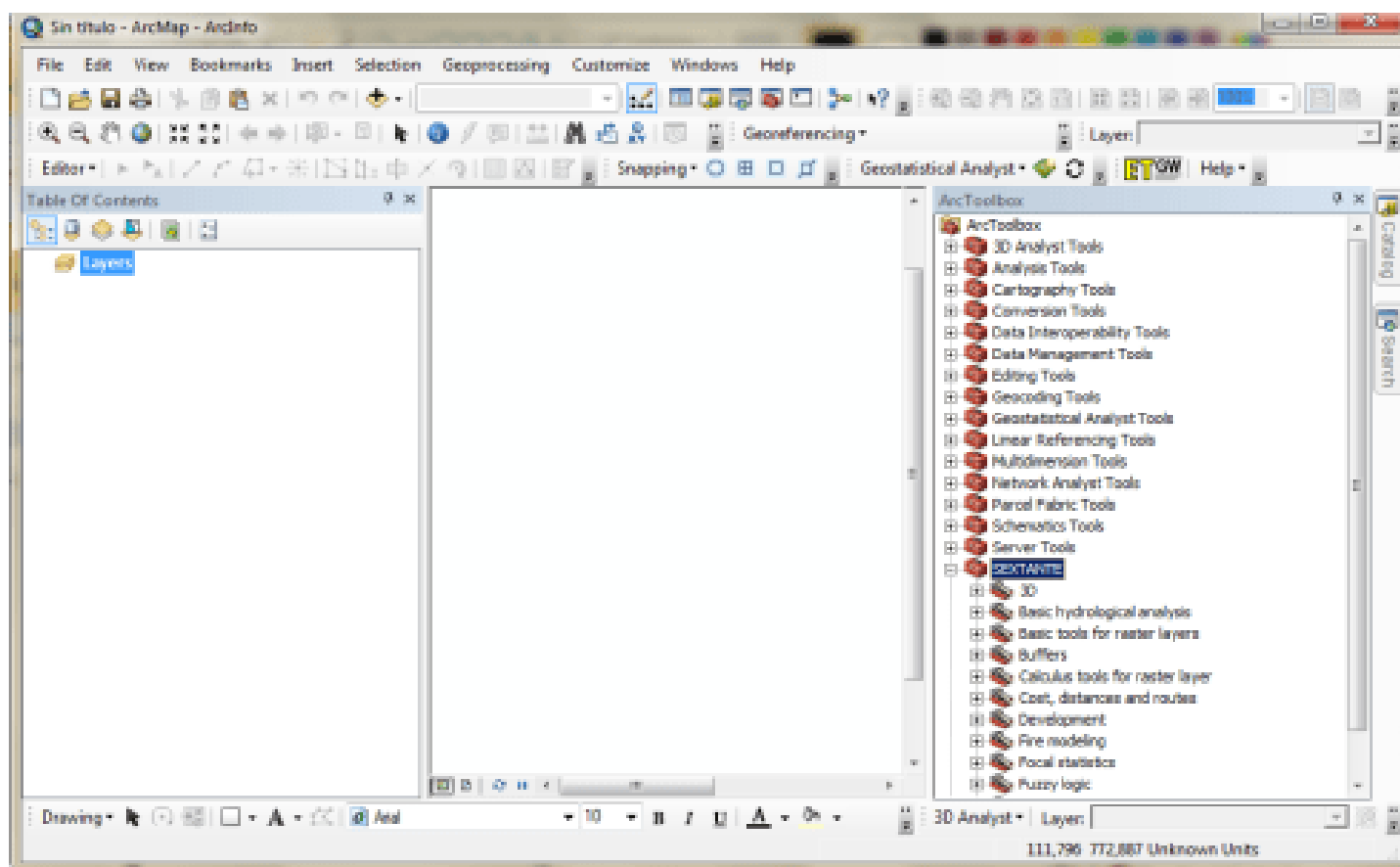


Figura 5. Captura de pantalla ArcGIS. Fuente: Elaboración Propia.

Las siguientes figuras, corresponden al modelado de la pluma de contaminación. En este punto, se comienza a descargar la información referente a las concentraciones de arsénico en los puntos de muestreo según su profundidad.

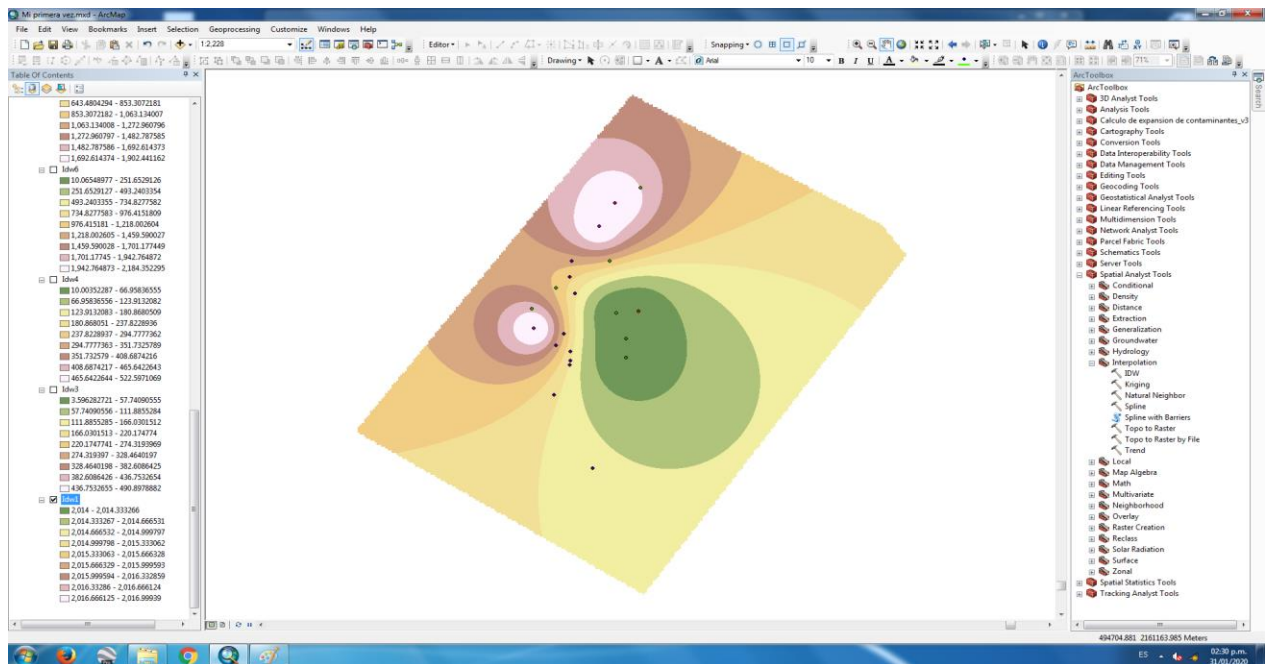


Figura 6. Captura de pantalla ArcGIS (Proceso de modelación). Fuente: Elaboración Propia.

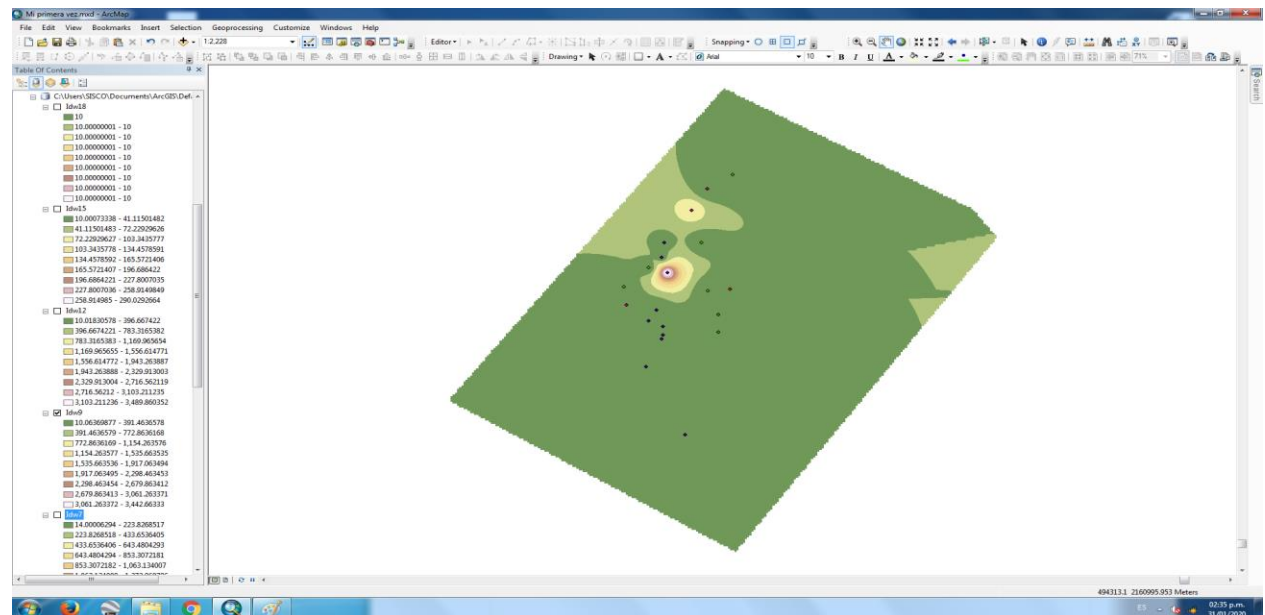


Figura 7. Captura de pantalla ArcGIS (Proceso de modelación). Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, se presenta la tabla de datos la cual se obtuvo al realizar el muestreo destinado a verificar los resultados del método de sedimentación/estabilización, aplicado en el proceso de remediación de los suelos. En la misma se aprecian el número de identificación del punto de muestro (ID), metros de profundidad en el suelo a la que se tomó la muestra, además de la concentración de arsénico en dichos puntos de muestreo.

Tabla 6. Resultados del MFC de arsénico. Fuente: SEMARNAT, 2019.

ID	Profundidad (m)	Concentración (mg/kg)
IQ-24	3.0	99.00
IQ-24	6.0	164.30
IQ-24	9.0	181.50
IQ-24	12.0	154.20
IQ-21	6.0	1635.00
IQ-21	9.0	3451.00
IQ-21	12.0	3498.00
IQ-23	3.0	499.10
IQ-23	6.0	1214.00
IQ-23	9.0	158.90
IQ-23	12.0	448.40
IQ-16	3.0	82.20
IQ-16	6.0	326.30
IQ-16	9.0	76.50
IQ-16	12.0	33.10
IQ-15	3.0	169.30
IQ-15	6.0	312.40
IQ-15	9.0	323.80
IQ-8	1.5	10.00
IQ-8	3.0	18.90
IQ-8	4.5	10.00
IQ-8	6.0	10.00
IQ-8	9.0	10.00
IQ-8	12.0	10.00

IQ-8	15.0	10.00
IQ-8	18.0	10.00
IQ-15	12.0	140.00
IQ-17	3.0	2.35
IQ-17	6.0	933.80
IQ-17	9.0	48.60
IQ-17	12.0	87.80
IQ-18	3.0	103.30
IQ-18	6.0	495.20
IQ-18	9.0	433.10
IQ-18	12.0	10.80
IQ-11	1.5	10.00
IQ-11	3.0	10.00
IQ-11	4.5	10.00
IQ-11	6.0	10.00
IQ-11	9.0	10.00
IQ-11	12.0	10.00
IQ-11	15.0	10.00
IQ-11	18.0	10.00
IQ-11	20.0	10.00
IQ-11	21.0	10.00
IQ-19	3.0	42.54
IQ-19	6.0	16.90
IQ-19	9.0	14.66
IQ-19	12.0	45.11
IQ-32	3.0	10.00
IQ-32	6.0	10.00
IQ-32	9.0	10.00
IQ-32	12.0	10.00
IQ-31	3.0	10.00

IQ-31	6.0	10.00
IQ-6	1.5	10.00
IQ-6	3.0	10.00
IQ-6	4.5	10.00
IQ-6	6.0	10.00
IQ-6	9.0	10.00
IQ-6	12.0	10.00
IQ-6	15.0	10.00
IQ-6	18.0	10.00
IQ-4	1.5	10.00
IQ-31	9.0	10.00
IQ-31	12.0	10.79
IQ-4	3.0	10.00
IQ-4	4.5	10.25
IQ-4	4.5	10.00
IQ-4	6.0	10.00
IQ-4	9.0	13.25
IQ-4	12.0	10.00
IQ-4	15.0	10.00
IQ-A1	3.0	212.10
IQ-A2	3.0	10.00
IQ-A3	3.0	14.47
IQ-A4	3.0	121.50
IQ-A1	6.0	224.10
IQ-A2	6.0	25.02
IQ-A3	6.0	143.70
IQ-A4	6.0	138.80
IQ-A1	9.0	17.43
IQ-A2	9.0	10.00
IQ-A3	9.0	58.20

IQ-A4	9.0	148.80
IQ-A1	12.0	10.00
IQ-A2	12.0	10.00
IQ-A3	12.0	11.90
IQ-A4	12.0	285.00
IQ-A1	15.0	10.00
IQ-A2	15.0	10.00
IQ-A3	15.0	10.00
IQ-A4	15.0	290.10
MP1 A1As	1.5	637.94
MP1 A1As	3.0	300.74
MP1 A1As	4.5	118.00
MP1 A1As	6.0	18.73
MP1 A1As	7.5	13.91
MP1 A1As	9.0	38.94
MP2 A1As	1.5	120.01
MP2 A1As	3.0	116.09
MP2 A1As	4.5	523.26
MP2 A1As	6.0	2191.00
MP2 A1As	7.5	1904.69
MP2 A1As	9.0	1170.85
MP2 A1As	1.5	418.21
MP2 A1As	3.0	223.97
MP2 A1As	4.5	121.82
MP2 A1As	6.0	258.04
MP2 A1As	7.5	95.86
MP2 A1As	9.0	47.88

4.1. Gráficos ArcGis

A continuación, se presentan los gráficos de modelación mediante el programa ArcGIS. Estos mismos muestran el nivel de afectación por contaminación con arsénico a diferentes profundidades. De acuerdo con el informe de muestreo que fue proporcionado por la SEMARNAT, el tiempo y constante vertido, a través de fugas y derrames de diversos contaminantes entre ellos el arsénico, provocaron la filtración de este a profundidades que superan los cuatro metros. Por otro lado, la concentración de arsénico en miligramos sobre kilogramos (mg/kg) en el suelo presenta valores que superan a los establecidos por la norma vigente.

4.1.1. Muestreo a 1.5 m

En la siguiente figura se muestra el modelado de la pluma de contaminación a 1.5 metros. En la misma se aprecian varios puntos de muestreo que registraron altas concentraciones de arsénico. Dichos sitios corresponden a la ubicación de los depósitos de materia prima, en este caso de arsénico. Adicionalmente, se aprecian concentraciones en un rango de 400-600 a 3000-4000 ppm (partes por millón) de dicha sustancia.

Muestreo de As a 1.5 m

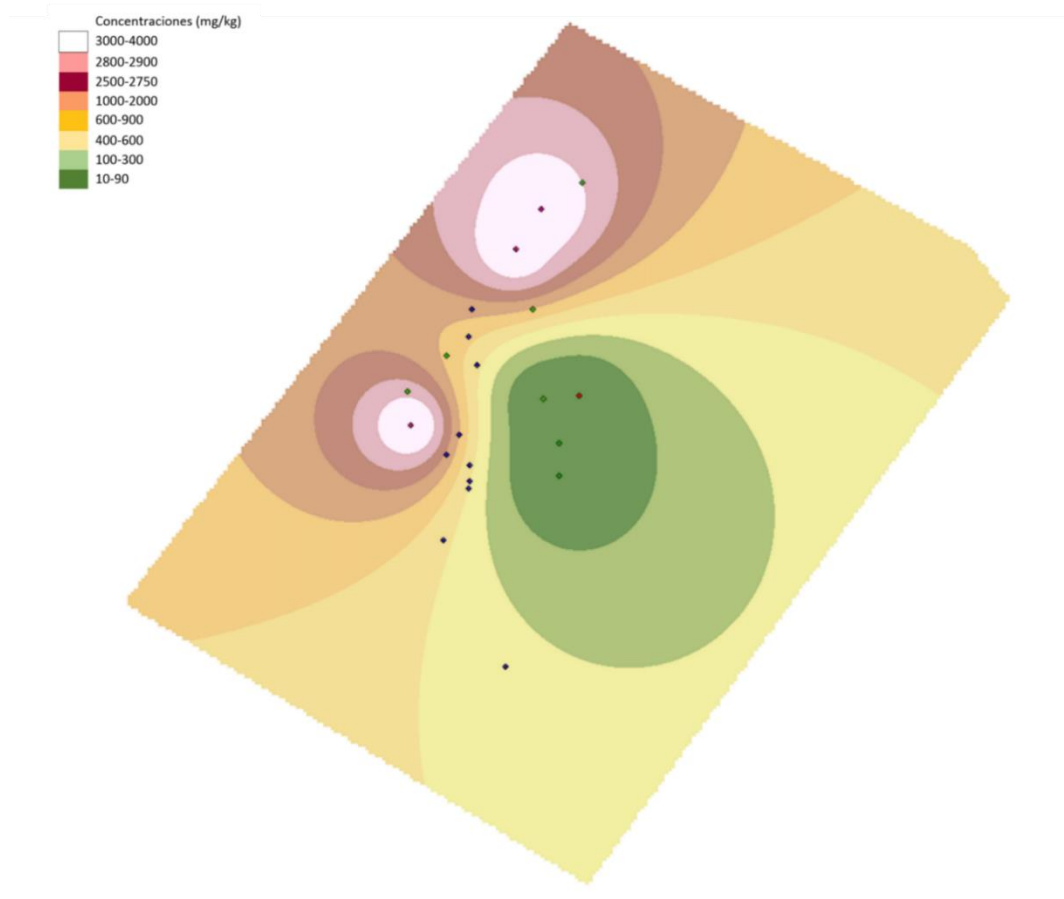


Figura 6. Contaminación por As a 1.5 m. 2019. Fuente: Elaboración Propia.

4.1.2. Muestreo a 3.0 m

En la capa correspondiente a la modelación del muestreo a 3.0 metros de profundidad, se aprecia una menor cantidad de sitios altamente contaminados por arsénico. Presentándose un único punto con concentraciones de 3000-4000 ppm. En su mayoría se presentan sitios con rangos de concentración que van desde 10-90, 400-600 y 600-900 ppm.

Muestreo de As a 3.0 m

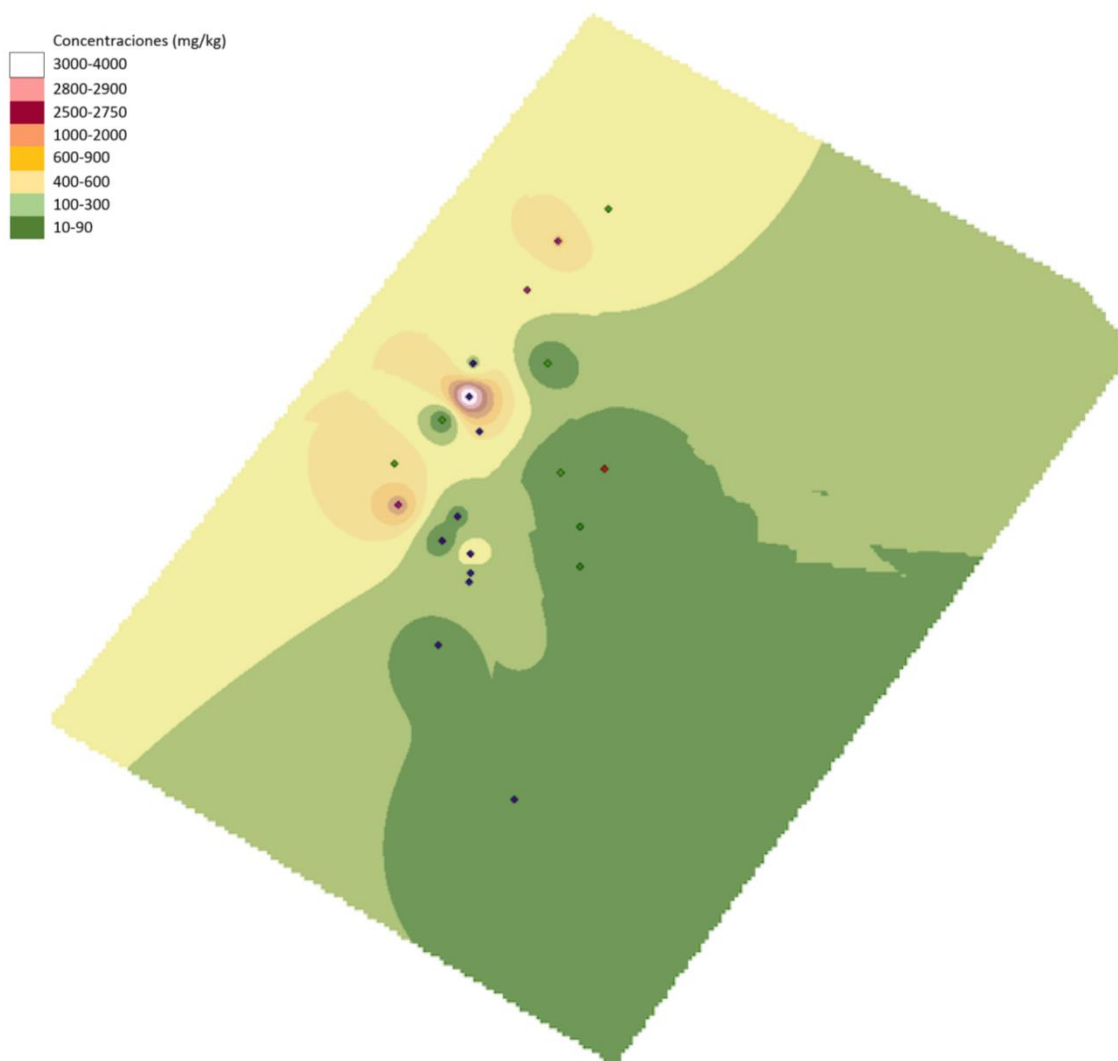


Figura 7. Contaminación por As a 3.0 m. 2019. Fuente: Elaboración Propia.

4.1.3. Muestro a 4.0 m

En esta figura se aprecian, al igual que las anteriores, la distribución de la contaminación en el suelo. En este caso a cuatro metros de profundidad. Adicionalmente, la mayor parte de la contaminación se ubica en un área menor, misma que presenta rangos de concentración de arsénico de 600 a 4,000 ppm.

Muestreo de As a 4.0 m

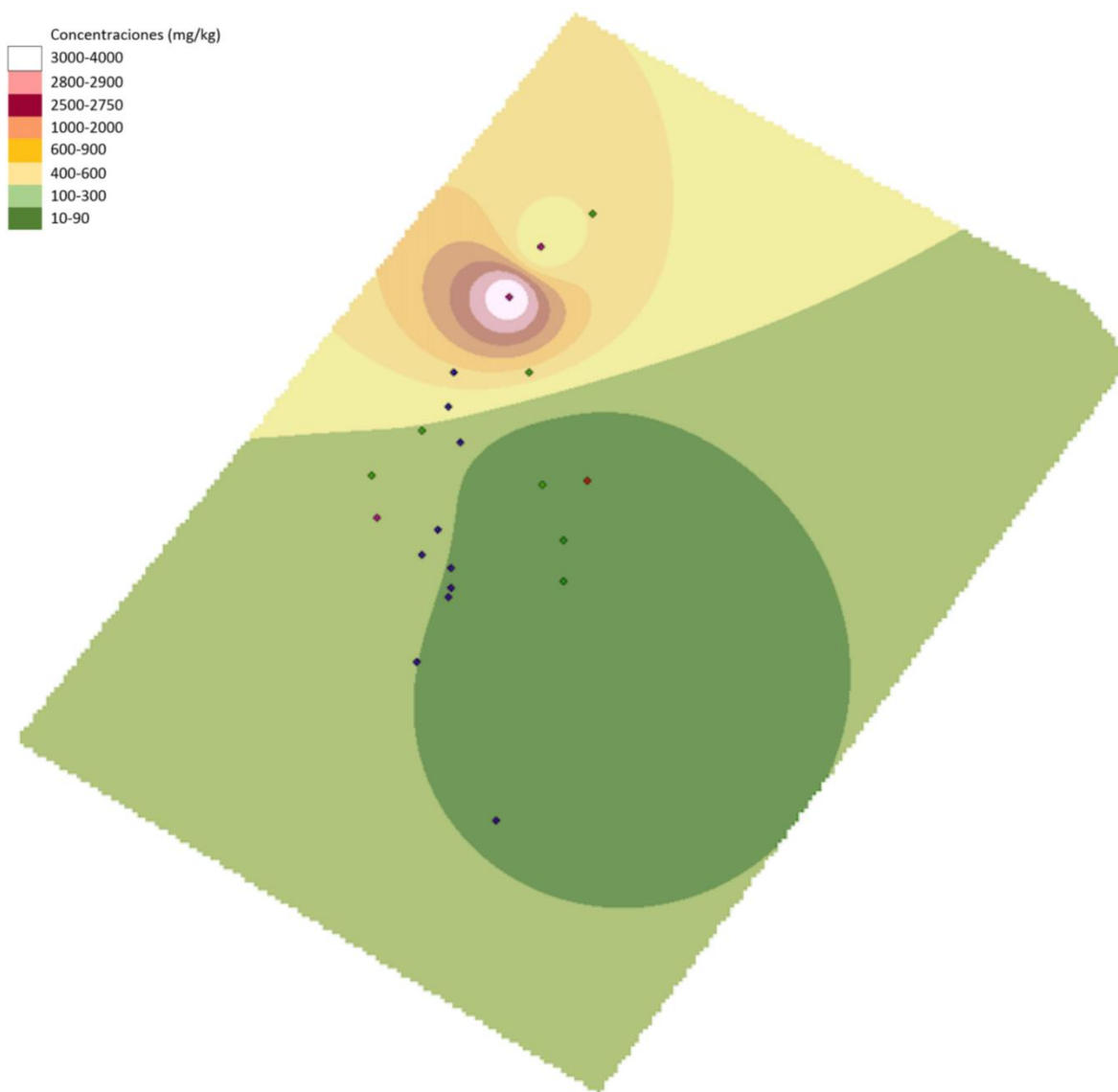


Figura 8. Contaminación por As a 4.0 m. 2019. Fuente: Elaboración Propia.

4.1.4. Muestreo a 6.0 m

Al igual que la figura anterior, se aprecia una menor área contaminada por arsénico, cuyos valores de concentración en ppm son similares. Del mismo modo, el muestreo confirmó la presencia zonas con bajos niveles de contaminación, mismas que conforman un gran porcentaje del predio perteneciente al promovente.

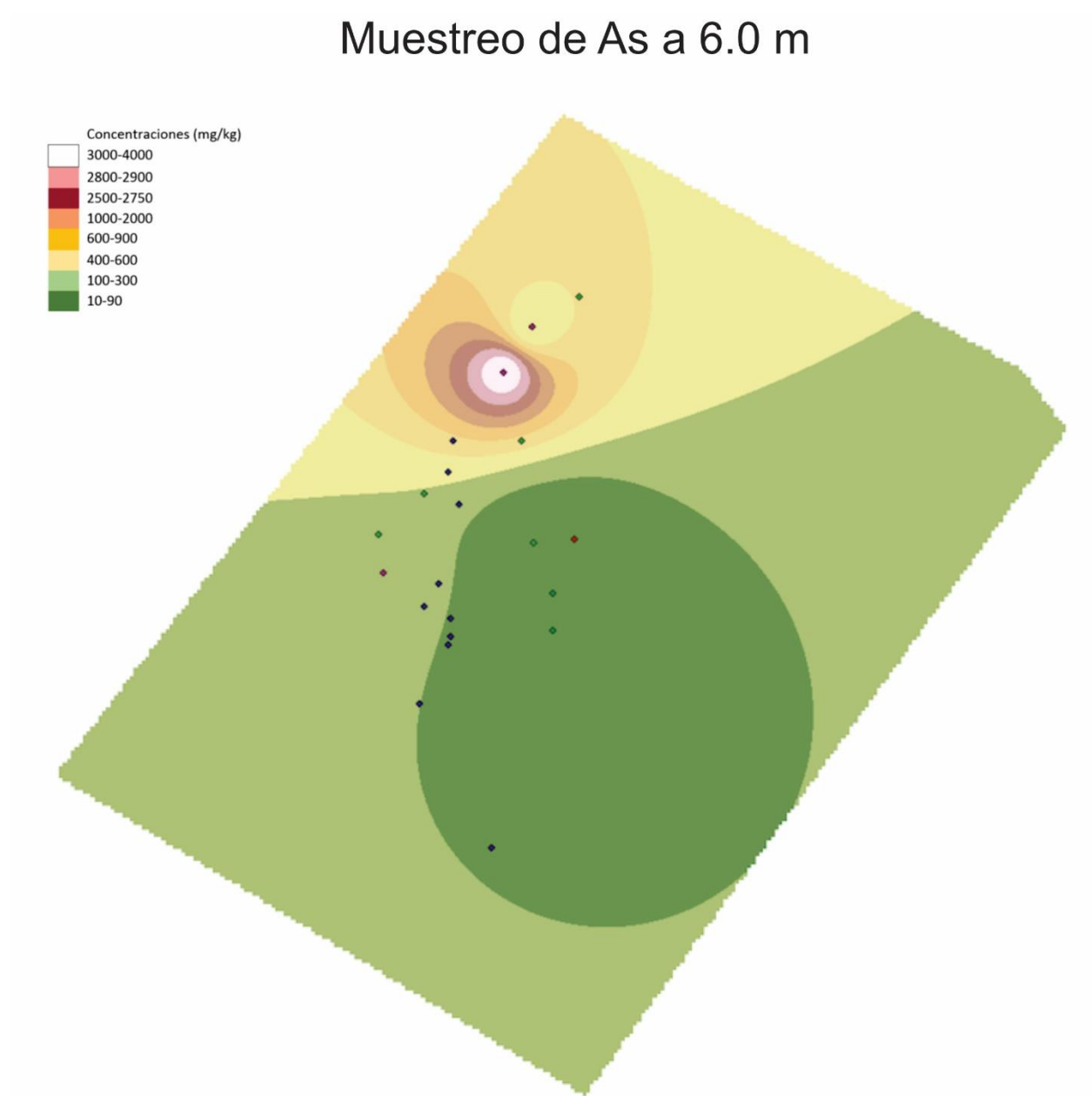


Figura 9. Contaminación por As a 6.0 m. 2019. Fuente: Elaboración Propia.

4.1.5. Muestreo a 7.0 m

Finalmente, el muestreo a siete metros de profundidad provee información que comprueba la infiltración de los contaminantes a través del suelo y subsuelo, ambos, producto de las precipitaciones pluviales de la región. A diferencia de muestreos anteriores, existe un mayor porcentaje de áreas contaminadas, en proporción a las que presentan una menor o nula presencia de arsénico.

Muestreo de As a 7.0 m

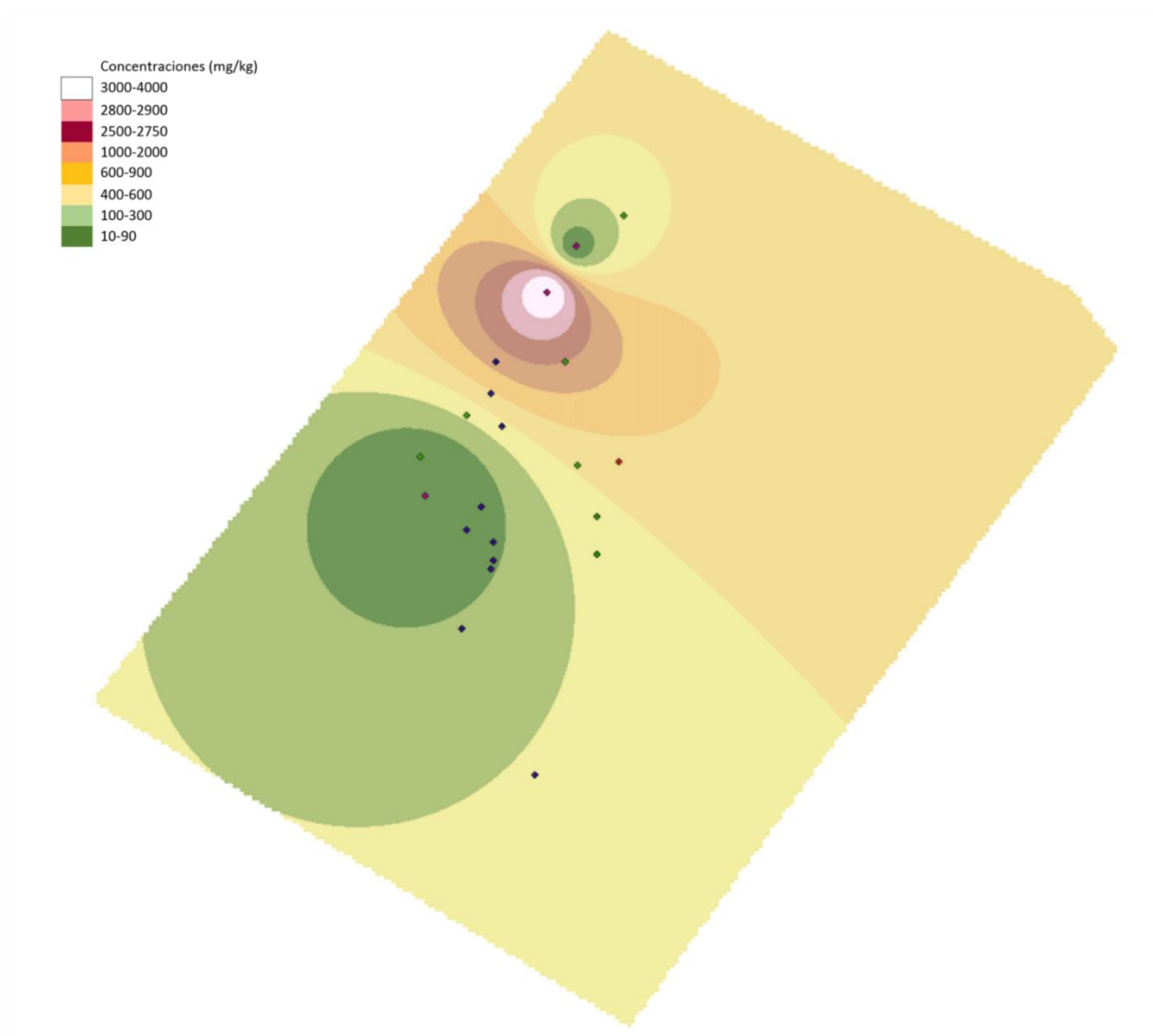


Figura 10. Contaminación por As a 7.0 m. 2019. Fuente: Elaboración Propia.

4.2. Análisis de datos

Con base en los resultados obtenidos por la modelación de la pluma de contaminación del caso de estudio, se puede afirmar que existe presencia de arsénico en altos niveles permeando los 1.5, 4 y 7 metros de profundidad. Teniendo en cuenta que el promovente puso en marcha el método de Estabilización/Solidificación, para el tratamiento de las zonas con mayor afectación por el contaminante anteriormente mencionado, es posible observar que dicha técnica no ha sido exitosa, pues su implementación no ha dado los resultados esperados, debido a que el proceso de fraguado del cemento portland no está consolidado, por lo que esta situación ha desembocado en la liberación paulatina del contaminante en el suelo e infiltrándose a niveles más profundos.

No obstante, cabe mencionar que los puntos de muestreo se encuentran en las zonas donde se realizó la aplicación del método de S/E, el cual durante el proceso de fraguado, presentó ciertos inconvenientes pues el cemento presentó carece permeabilidad y compresibilidad aceptables, para las cuales se requiere los valores de 1×10^{-8} m/s y 1Mpa (Mega pascal) o más, respectivamente, es necesario recalcar que estos parámetros son vitales para evitar la filtración y expansión del arsénico una vez finalizada la implementación del S/E.

Para una mejor comprensión del alcance de esta problemática, el promovente manifestó que la contaminación sumó un área de aproximadamente 3096.90 m² y un volumen de aproximadamente 16,120.6 m³ de suelo en los sitios anteriormente denominados como **ZT-A** y **ZT-B**.

Se puede observar a través de los gráficos, el rango y extensión de la contaminación, la cual, se encuentra principalmente en los primeros metros de suelo, sin embargo, estos niveles de contaminación son más altos en los 1.5 a los 7 m tal es el grado de infiltración del arsénico, producto de las deficiencias del método S/E que, como ya se mencionó, logra alcanzar los acuicludos ubicados 9.0m de profundidad. Debido a que no son competencia de la DGGIMAR, el tratamiento de estos cuerpos de agua pasa a ser supervisados por la autoridad competente.

4.3. Propuesta de Remediación

Dadas las circunstancias presentadas por el promovente y los resultados de laboratorio proporcionados a la DGGIMAR, adjunto a los conocimientos adquiridos en las actividades desarrolladas dentro de la misma Dirección General; se presenta una Propuesta de Remediación (PR) abordando la LGPGIR y su reglamento, las normas aplicables al caso de estudio y las competencias propias de la Ingeniería Ambiental.

4.3.1. Proceso de la Propuesta de Remediación

Considerando la situación relacionada con el caso de estudio, se hace necesaria la aplicación de una Propuesta de Remediación la cual se adecue de mejor manera, en factor de las propiedades del caso en turno. Parte de las razones para aplicar una PR al caso de estudio, se debe a las múltiples problemáticas que se presentaron a lo largo del desarrollo del muestreo, análisis y tratamiento del sitio afectado por arsénico. Con base en lo anterior, esta PR gira entorno a mejorar el procedimiento efectuado por el promovente y del responsable encargado del muestreo y análisis de este.

A continuación, se presentan los pasos para llevar a cabo la realización de una PR:

Paso 1: Análisis preliminar y colección de datos

En esta fase se realizará, como su nombre indica, un análisis preliminar del sitio donde se encuentra el área contaminada. Esto se llevará a cabo para coleccionar información que servirá de base para los próximos puntos de la PR. La información se conforma, pero no se limita, a lo siguiente:

- Datos del promovente
- Ubicación del sitio
- Modalidad del caso (A. Emergencia Ambiental / B. Pasivo Ambiental)
- Inicio del trámite SEMARNAT-07-035

Paso 2: Caracterización y muestreo

Durante el desarrollo de esta, se efectuarán los correspondientes procedimientos para la recolección de información In Situ, para la caracterización y determinar el alcance de la contaminación tanto en extensión como en profundidad, así mismo, identificar qué elementos ambientales están afectados (suelo, agua, entre otros). Con referencia en lo anterior, se procederá a seleccionar el tipo de tratamiento a emplear para mitigar el efecto de las sustancias presentes en el lugar. Aunado a lo anterior, se requiere la contratación de un laboratorio para la emisión de resultados que confirmen la presencia de las sustancias.

En su defecto, si existen afectaciones a agua u otro elemento ambiental, se debe informar a la dependencia gubernamental adecuada para dar seguimiento al caso.

Paso 3: Análisis de resultados y selección de técnica o método de tratamiento

Posteriormente, con base en resultados emitidos por el responsable del muestreo, se analizará el alcance y magnitud del impacto de los contaminantes. Teniendo en cuenta lo anterior, se elegirá cual es la técnica o método apropiado para el inicio del tratamiento al suelo afectado. Para el caso en turno, se decidió el uso de la técnica de Sedimentación/Estabilización, esto puede variar en factor de las necesidades, propiedades del contaminante, obstáculos y características del terreno.

Paso 4: Aplicación y monitoreo de la técnica o método de tratamiento

Una vez seleccionada la técnica o método de tratamiento, se realizará la aplicación de esta, considerando los aspectos relacionados con un funcionamiento óptimo y eficiente de la misma. A continuación, se llevará a cabo el monitoreo al respecto del comportamiento del tratamiento aplicado, de este modo se tendrá un panorama sobre el efecto que está teniendo sobre contaminante y corroborar si este mismo presenta o no problemáticas, al mismo tiempo, revisar el progreso obtenido y, de ser necesario, cambiar el tipo de tratamiento en caso de no presentar avances.

Si se presenta un cambio en el tratamiento del suelo u otro elemento ambiental afectado, se debe informar a las dependencias involucradas con el proceso de remediación.

Paso 5: Finalización del proceso

En el caso de que no se hayan presentado cambios en la metodología empleada para el tratamiento y remediación, se procederá con la verificación del progreso de esta. Si los resultados del tratamiento son los esperados, la dependencia encargada del proceso dará constancia de la conclusión del proceso de remediación.

4.3.2. Aspectos jurídicos del proceso

Para llevar a cabo la realización de la PR, es necesario tener en cuenta la LGPGIR y su reglamento:

- Art.134. Los programas de remediación están integrados por:
 - Estudios de caracterización.
 - Estudios de evaluación de riesgo ambiental.
 - Investigaciones históricas.
 - Propuesta de Remediación.

- Art. 137. Los programas de remediación, así como los estudios de caracterización y riesgo ambiental se podrán llevar a cabo por el responsable de la contaminación o daño ambiental de manera directa o a través de responsables técnicos. Los responsables técnicos pueden ser de:
 - Instituciones de educación superior.
 - Prestadores de servicios de tratamiento autorizados.
 - Otra persona que acredite la formación profesional y experiencia en la remediación de suelos contaminados.

- Art 143. Las propuestas para emergencias y pasivos ambientales se integran al programa de remediación con el siguiente contenido:
 - Técnicas o procesos de remediación y muestreo.
 - Datos de los responsables técnicos.
 - Descripción del equipo a emplear.
 - Concentraciones, niveles o LMP de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM).
 - Descripción de las acciones de remediación con base en niveles propuestos.
 - Monitoreo del sitio.
 - Calendarización de las actividades.
 - Uso futuro del sitio remediado.
 - Plan de desalojo
 - Plan de seguimiento.

- Art. 144. La secretaría evaluará y aprobará la Propuesta de Remediación en un término de 60 días hábiles
- Art. 148. Cuando el momento de la emergencia sede, se aplicarán medidas de contención de los materiales o residuos peligrosos liberados, no se permite:
 - Lavado de suelos.
 - Extracción o remoción.
 - Mezcla de suelos.
 - Aplicación de oxidantes químicos.

Parte de esta Propuesta de Remediación consiste en desarrollar un proceso de tratamiento adecuado del suelo contaminado con arsénico, así que, para ello recurriremos a la NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004, En ésta misma encontraremos los Límites Máximos Permisibles (LMP) de arsénico en suelo de uso industrial, mismo que es de 260 mg/kg.

Teniendo en cuenta el dato anterior, iniciar con el proceso de caracterización y muestreo dentro del área afectada, posterior a la entrega de resultados, determinar el curso de acción para la remediación del suelo del predio, que bien, puede ser tratado por el método de S/E o transportar el suelo a disposición final. Si se elige la aplicación de la técnica de S/E, considerar:

- Los materiales y equipos deben ser los adecuados.
- La caracterización edafológica del sitio de aplicación es un aspecto fundamental.
- El proceso de fraguado debe ser vigilado constantemente para evitar fallos en la implementación de la técnica.
- Las pruebas de compresión y permeabilidad están sujetas al proceso de fraguado, de este modo, su correcta implementación facilitará que la técnica tenga éxito.
- Se deben alcanzar los valores de permeabilidad y compresibilidad de 1×10^{-8} m/s y 1 Mpa (Mega pascal) o más, respectivamente.

Y, en el supuesto de ser necesario la reubicación del suelo contaminado para disposición final, considerar:

El tratamiento del agua subterránea, en este caso acuícludos, y en acuerdo con el promovente, su tratamiento no sería necesario, a no ser que dé este cuerpo de agua se pretenda un posible uso, ya sea para consumo humano o industrial. En este último caso, se propone la disposición del agua para su tratamiento, con la finalidad de remover el arsénico de su composición y de este modo de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996 y los LMP referentes al agua destinada al uso industria, tengan concentraciones adecuadas para ser empleadas en actividades industriales o agrícolas.

Finalmente, llevar el MFC considerando los LMP de la NOM de este modo se garantizará una adecuada aplicación de los métodos empleados para la remediación y el tratamiento de suelo y agua contaminada con arsénico respectivamente.

Conclusiones

Conclusiones

Durante el desarrollo del proyecto, se llevó a efecto el análisis de los procesos y técnicas empleados por el promovente y del responsable de la remediación del suelo contaminado con arsénico, asimismo, de la información y datos en control de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). En factor de los aspectos anteriormente mencionados, se logró obtener la modelación de la pluma de contaminación con base en el muestreo proporcionado por el responsable de la remediación.

En el transcurso del análisis de la información y datos dispuestos por SEMARNAT, se consolidó un compilado de estos mismos, con la finalidad de discernir la situación actual del caso de estudio.

Con base en la modelación, se observa que el uso de la técnica de Solidificación/Estabilización tiene un efecto significativo en el tratamiento del suelo, no obstante, debido a las prácticas efectuadas sobre el mismo, las cuales no fueron satisfactorias en su mayoría, existen afectaciones por arsénico de seis a nueve metros de profundidad.

Si bien las técnicas para remediación de suelos están limitadas a un porcentaje de eficiencia en factor de los contaminantes y condiciones ambientales a las que se encuentre sujeta la aplicación de estas, en el caso en turno, se presenta una situación en la cual deficiencias en la atención del proceso de remediación redujeron su eficiencia drásticamente. Sin embargo, no se trata de una situación irreversible. En conjunto con los resultados previamente obtenidos, se realizó una Propuesta de Remediación, con la finalidad de brindar una visión alterna a un mejor manejo del caso de estudio.

En referencia a la aplicabilidad jurídica del proyecto, la DGGIMAR tiene como objetivo llevar a cabo los protocolos adecuados para garantizar la correcta aplicación de los métodos empleados en la remediación del impacto ambiental generado por la actividad antropogénica. En este mismo orden de ideas, los recursos legislativos como la LGEEPA y la LGPGIR junto a sus respectivos reglamentos, proporcionan las bases con las cuales se busca garantizar un medio ambiente seguro, además de la protección del mismo a través de la prevención y gestión en materia de residuos.

Asimismo, la normativa oficial mexicana proporciona los parámetros bajo los cuales se llevó a cabo la remediación, teniendo en cuenta las condiciones actuales del suelo y su composición natural anterior a los eventos que desembocaron en el impacto ambiental. En el presente caso de estudio, también se emplearon en la aplicación del método de S/E, sin embargo, la implementación de este fue inadecuado tal como se aprecia en los gráficos de ArcGIS.

Por tanto, el promovente incumple con las leyes y normas en las que la DGGIMAR sustenta sus actividades. De este modo, es necesario cambiar los controles de calidad durante la implementación de la metodología ya mencionada, con el fin de asegurar el cumplimiento de los objetivos establecidos y evitar errores durante los esfuerzos de remediación del suelo.

Competencias Aplicadas

Competencias desarrolladas o aplicadas

Las competencias desarrolladas en el transcurso de las prácticas o residencias profesionales en la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), en paralelo a las actividades de la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR) se aplicaron y desarrollaron las siguientes competencias del perfil de egreso del Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco (Cédula 4.2.1A.):

- AE1. Identificar, resolver y formular problemas de Ingeniería Ambiental aplicando conocimientos de ciencias básicas y ciencias de la ingeniería.
- AE2. Analizar, aplicar, proponer y gestionar procesos de diseño de Ingeniería que resulten en proyectos sustentables que cumplen las necesidades o requerimientos especificados.
- AE3. Analizar, utilizar e interpretar los datos obtenidos a partir de la experimentación mediante el juicio ingenieril estableciendo planes de acción y diseño de procesos o equipos, además con el uso de TIC's y Software de aplicación ambiental.
- AE4. Comunicar de manera efectiva, oral y escrita a diferentes audiencias, los conocimientos obtenidos de manera individual y mediante el trabajo en equipo de forma eficaz y eficiente.
- AE5. Reconocer sus responsabilidades éticas y profesionales en situaciones relevantes para la Ingeniería, mediante juicios informados que consideren el impacto de las soluciones de Ingeniería Ambiental en los contextos global, económico, ambiental y social, así como las implicaciones normativas de la legislación ambiental, atendiendo la actualización profesional y permanente, mediante la investigación y emprendimiento.
- AE7. Estructurar y aplicar proyectos para el dimensionamiento, adecuación, operación, mantenimiento y desarrollo tecnológico de tratamiento, prevención, control y transformación de efluentes sólidos, líquidos y gaseosos contaminantes

Referencias Bibliográficas

Referencias bibliográficas

Anawar, H., J. Akai, K. Komaki, H. Terao, T. Yosioka, T. Ishizuka, S. Safiullah, and K. Kikuo. 2003. *Geochemical occurrence of arsenic in the groundwater of Bangladesh sources and mobilization processes*. J. Geochem. Explorat. 77: 109-131.

Aragonés S., N., M. Palacios D., A. Avello de Miguel, P. Gómez R., M Rodríguez, M. Martínez C. y M. J. Rodríguez B. 2001. *Nivel de arsénico en abastecimientos de agua de consumo de origen subterráneo en la comunidad de Madrid*. Rev. Esp. Salud Públ. 75: 421-432.

Asavapisit, S.; Flower, G.; Cheeseman C.R. 1997. *Solution chemistry during hydration in the presence of metal hydroxide wastes*. Cement and Concrete Reserch. 27: 1249-1260.

Basu, A., D. Saha, R. Saha, T. Ghosh, and B. Saha. 2014. *A review on sources, toxicity and remediation technologies for removing arsenic from drinking water*. Res. Chem. Intermed. 40: 447-485.

Campos, V., C. Valenzuela, M. Alcorta, G. Escalante, and M. Mondaca. 2007. *Isolation of Arsenic resistance bacteria from volcanic rocks of Quebrada Camarones, Parina Region, Chile*. Gayana 71: 150-155.

Castro, L. 2000, *Diseño de sistemas de estabilización/solidificación base silicatos para remediar suelos contaminados con metales pesados*. Monterrey, México.

Conner, J.R.; Hoeffner, S.L. 1998. *Critical review of stabilisation/solidification technology*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 28 (4), 397-462.

EPA. 2003. *Guía Para El Ciudadano Sobre Solidificación/Estabilización*. Washington D.C., EUA.

EPA (Environmental Protection Agency). 2006. *Edition of the drinking water standards and health advisories*. Environmental Protection Agency (EPA/822-R-06-013). Washington, DC, USA.

Emsley, J. 2001. *Nature's building blocks: An A-Z guide to the elements*. Oxford University Press. New York, NY, USA.

Gary D. Christian. (2009). *Química Analítica*. México: McGraw Hill.

Gillispie, E. C., T. D. Sowers, O. W. Duckworth, and M. L. Polizzotto. 2015. *Soil pollution due to irrigation with arseniccontaminated groundwater: Current state of science*. Curr. Pollut. Rep. 1: 1-12.

Hebatpuria, V.M.; Arafat, H.A.; Bishop, P.L.; Pinto, N.G. 1999. *Leaching behaviour of selected aromatics in cement-based solidification/stabilization under different leaching tests*. Environmental Engineering Science 16 (6), 451-463.

Hills, L.; Johansen, V.C. 2007. *Hexavalent Chromium in Cement Manufacturing: Literature Review*. SN2983, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA.

Jauregui M. 2006. *Estabilización De Residuos Con Arsénico Mediante El Proceso De Fijación Química Y Solidificación (FQS)*, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de ingeniería.

Johnson, A.I. 1967. *Specific Yield. Compilation of Specific Yields for various materials*. Geological Survey Water Supply Paper 1662D, 74 pp.

Josefina Viades Trejo. (12 de marzo de 2013). *Fenómenos de Superficie*. UNAM, 3, 1-17. 05/08/2021, FISICOQUÍMICA Base de datos.

Juárez Badillo y Rico Rodríguez. (2005). *Mecánica de Suelos*. México: Limusa Editorial.

Kosmatka, S.H. y W.C. Panarese. 1992. *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. A.C. 13a edición, 230 pp. México, DF.

Krumova, K., M. Nikolovska, and V. Groudeva. 2008. *Isolation and identification of arsenic-transforming bacteria from arsenic contaminated sites in Bulgaria*. Biotechnol. Biotechnol. Eq. 22: 721-728.

Mandal, B. K. and K. T. Suzuki. 2002. *Arsenic round the world: A review*. Talanta 58: 201-235.

Mondal, P., C. B. Majumder, and B. Mohanty. 2006. *Laboratory based approaches for arsenic remediation from contaminated water: Recent developments*. J. Hazardous Mat. 137: 464-479.

MSc. Susana Suárez Tamayo, Msc. Enrique Molina Esquivel. (2014). *El desarrollo industrial y su impacto en el medio ambiente*. REVISTA CUBANA DE HIGIENE Y EPIDEMIOLOGÍA, 52, 357-363.

Mukhopadhyay, R., B. Rosen, L. Phung, and S. Silver. 2002. *Microbial arsenic: from geocycles to genes and enzymes*. FEMS Microbiol. Rev. 26: 311-325.

Pérez C. 2016. *Estabilización/Solidificación De Metales Peligrosos En Matrices Geopoliméricas Que Contiene Zeolitas*, Universidad de Sevilla, Dep. Ingeniería Química y Ambiental.

Rakib, M. A. and M. Bhuiyan. 2014. *Arsenic contamination: Food toxicity and local perception*. Int. J. Sci. Res. Environ. Sci. 2: 1-7.

Rosen, B. P., A. A. Ajees, and T. R. McDermott. 2011. *Life and death with arsenic. Arsenic life: an analysis of the recent report "A bacterium that can grow by using arsenic instead of phosphorus"*. Bioessays 33: 350-357.

Santanu, P.; Pak K.Y. 2006. *Solidification-stabilization of organic and inorganic contaminants using portland cement: a literatura review*. Environ. Rev. 14: 217-255.

Santini, J. M. and R. N. Vanden Hoven. 2004. *Molybdenumcontaining arsenite oxidase of the chemolithoautotrophic arsenite oxidizer NT-26. J. Bacteriol.* 186: 1614-1619.

Sergio Huerta Ochoa. (2017). *Planta Piloto de Fermentaciones*. UAM, 1, 1-5. 2019, De DEPARTAMENTO DE BIOTECNOLOGÍA, Base de datos.

Smedley, P. L. and D. G. Kinniburgh. 2002. *A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters*. Appl. Geochem. 17: 517-568.

Tsai, S. L., S. Singh, and W. Chen. 2009. *Arsenic metabolism by microbes in nature and the impact on arsenic remediation*. Curr. Opin. Biotechnol. 20: 659-667.

WHO (World Health Organization). 2003. *Arsenic in drinking-water. Guidelines for drinking-water quality Ginebra (Suiza)*, Organización Mundial de la Salud (WHO/SDE/WSH/03.04/ 75). Geneva, Switzerland. (Consulta: abril 12, 2014).