



GUÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN, LA GESTIÓN Y LA REHABILITACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS CON MERCURIO



Lee Bell
Asesor en políticas de
mercurio de IPEN

Marzo de 2016



un futuro sin tóxicos



un futuro sin tóxicos

IPEN es una red global líder conformada por 700 organizaciones no gubernamentales (ONGs) que trabajan en más de 100 países en desarrollo y países con economías en transición. IPEN trabaja para establecer e implementar políticas y prácticas de seguridad química que protejan la salud humana y el medio ambiente a través de fortalecer las capacidades de sus organizaciones miembro para implementar actividades prácticas, aprender del trabajo de unos y otros, y trabajar a nivel internacional por establecer prioridades y lograr la implementación de políticas nuevas. Su misión es lograr un futuro libre de sustancias tóxicas para todos.

IPEN lanzó su Campaña por un Futuro Libre de Mercurio para abordar la alarmante amenaza que implica el mercurio para la salud humana (como daños permanentes al sistema nervioso y los riñones) y el medio ambiente en todo el mundo. Después de la adopción del Convenio de Minamata sobre el Mercurio en 2013, IPEN lanzó su Programa Internacional de Actividades de Apoyo al Convenio sobre el Mercurio (IMEAP por sus siglas en inglés). Este programa proporciona financiamiento a organizaciones locales que trabajan a favor de la ratificación del Convenio sobre el Mercurio y de actividades de apoyo. Las actividades, que incluyen campañas de sensibilización, el monitoreo de la contaminación con mercurio, los informes sobre la situación nacional, y la identificación de sitios críticos, han ayudado a los gobiernos a prepararse para la ratificación a través de resaltar el problema del mercurio en 29 países en desarrollo y en transición.

AGRADECIMIENTOS

IPEN desea agradecer a los cientos de ONGs, organizaciones de la sociedad civil, grupos de trabajadores, y grupos del campo de la salud en todo el mundo por sus contribuciones a la Campaña de IPEN por un Futuro Libre de Mercurio y al Programa de Metales Tóxicos de IPEN. Con gratitud, IPEN aprecia el apoyo financiero proporcionado por los gobiernos de Suecia, a través de la Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo (SIDA por sus siglas en inglés), y de otros países donantes, que hicieron que fuera posible producir este documento. No se deberá suponer que los puntos de vista que aquí se presentan necesariamente reflejan la opinión oficial de las instituciones que proporcionan apoyo financiero.

Foto de la cubierta: (arriba) *Aguas residuales contaminadas con mercurio provenientes de un conjunto de molinos de bolas descargadas a un estanque séptico para peces (Banten, Indonesia, octubre de 2014). En un día caluroso, burbujas de agua ascienden a la superficie, cubierta de una delgada capa de mercurio* [Foto de: BaliFokus y Medicuss]; (a la derecha) *Interior de un recinto con control de olores durante la excavación* [Fuente: Gobierno Federal de Australia (2013)]; (a la izquierda) *entrenamiento práctico en fluo-rescencia de rayos X en Tailandia* [Fuente: Nicha Rakpanichmanee].

GUÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN, LA GESTIÓN Y LA REHABILITACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS CON MERCURIO

Lee Bell

Asesor en políticas de mercurio de IPEN

Marzo de 2016

CONTENIDO

Resumen ejecutivo.....	6
1. Introducción	8
1.1 Información básica sobre el mercurio y los sitios contaminados	9
1.2 El convenio de minamata y los sitios contaminados	12
2. La identificación y la caracterización del sitio - ¿Qué es un sitio contaminado con mercurio?	15
2.1 La definición de 'sitio'	16
2.2 La identificación del sitio.....	17
2.3 La investigación preliminar del sitio.....	20
2.3.1 El estudio de escritorio.....	20
2.3.2 La inspección del sitio.....	20
2.4 La investigación preliminar del sitio y la respuesta de emergencia	21
2.5 La investigación detallada y caracterización del sitio	22
3. La identificación y detección preliminar del sitio: función del gobierno, los asesores y las ONGs	24
3.1 Trabajo de detección en el sitio (muestreo)	25
3.2 El muestreo indirecto.....	26
3.3 El muestreo de cabello para detectar la exposición al mercurio.....	27
3.4 La recolección de muestras de cabello	27
3.5 El envío de las muestras de cabello recolectadas	28
3.6 El muestreo directo (en sitio).....	28
3.7 El muestreo del suelo y el agua para un análisis de laboratorio.....	31
4. La evaluación de riesgos	33
5. Los enfoques para la gestión y la rehabilitación de sitios contaminados	36
5.1 La gestión de sitios contaminados	38
5.1.1 El monitoreo.....	38
5.2 Los principios y enfoques de la rehabilitación	39
5.2.1 El enfoque de 'apto para su uso'	40
5.3 La validación	43
6. La tecnología y las técnicas de la rehabilitación	44
6.1 La contaminación puntual y difusa.....	45
6.2 Las tecnologías de rehabilitación de suelos contaminados con mercurio comprobadas.....	47
6.2.1 Excavación y tratamiento en el sitio (recuperación).....	47
6.2.2 Tratamiento posterior a la excavación (lavado y separación del suelo)	49
6.2.3 Los procesos de tratamiento térmico.....	50
6.2.4 La excavación y las tecnologías de inmovilización (excavación y eliminación).....	52
6.2.5 La amalgamación.....	52

6.2.6	La estabilización y la solidificación sin recuperación de mercurio ..	53
6.2.7	La estabilización/solidificación de los polímeros de azufre.....	54
6.2.8	La estabilización/solidificación con microcementos de azufre.....	55
6.2.9	La contención in situ.....	55
6.2.10	La eliminación fuera del sitio.....	56
6.2.11	La eliminación en el sitio.....	58
6.3.	Las tecnologías emergentes para la rehabilitación de suelos contaminados con mercurio	59
6.3.1	Las técnicas electrocinéticas.....	59
6.3.2	La fito-rehabilitación	59
6.3.3	La desorción térmica in situ.....	61
6.4	Las tecnologías comprobadas para el tratamiento de aguas contaminadas con mercurio	62
6.4.1	Bombear y tratar	62
6.4.2	Las barreras reactivas permeables	62
6.5	Las tecnologías emergentes para el tratamiento del agua.....	64
7.	Estudios de caso en sitios contaminados con mercurio – difusos y puntuales	65
7.1	Estudio de caso 1: Contaminación con mercurio en el río nura y sus alrededores	65
7.1.1	Las acciones de rehabilitación y sus resultados	67
7.2	Estudio de caso 2: La contaminación con mercurio en Kodaikanal, Tamil Nadu, India	69
7.2.1	Potenciales acciones de rehabilitación.....	73
8.	La gestión de la seguridad y la salud tanto ocupacional como comunitaria para sitios contaminados.....	75
8.1.	Resumen.....	76
8.2	La obligación de proteger y la responsabilidad social.....	77
8.3	Los registros de los riesgos	77
8.4	La información y la capacitación	78
8.5	La supervisión	78
8.6.	El almacenamiento general y los controles de transporte para contaminantes	79
8.7	El transporte y el almacenamiento a largo plazo de mercurio elemental de sitios contaminados	80
8.8	Los servicios en el centro de trabajo e instalaciones de primeros auxilios	82
8.9	El monitoreo de la exposición	83
8.10	Los programas de vigilancia sanitaria.....	83
9.	Los sitios contaminados y los requisitos del convenio de minamata sobre el mercurio: Involucrar a las partes interesadas	85
9.1	Guía para el involucramiento de las partes interesadas en el sitio específico.....	86
9.2	La implementación del involucramiento de las partes interesadas	88
9.3	Evaluación e informe sobre el involucramiento de las partes interesadas	89
10.	Referencias y bibliografía	90

RESUMEN EJECUTIVO

La firma del Convenio de Minamata sobre el Mercurio (el “Tratado sobre el Mercurio”), en 2013, representa el primer esfuerzo global por abordar la contaminación con mercurio. Sin embargo, el Tratado sobre el Mercurio actualmente carece de lineamientos concretos para la identificación, gestión y rehabilitación de sitios contaminados con mercurio bajo la disposición correspondiente (el artículo 12). Reconociendo la necesidad de ayudar a los países a actuar sobre los sitios contaminados, IPEN desarrolló el documento “Lineamientos para la identificación, la gestión y la rehabilitación de sitios contaminados con mercurio”, el cual proporciona lineamientos específicos para estas acciones.

Esta Guía para sitios contaminados de IPEN proporciona un análisis detallado de métodos, tanto contemporáneos como emergentes, para la identificación, la gestión y la rehabilitación de sitios contaminados con mercurio. Va más allá de la gestión motivada por los costos y los beneficios, para proponer disposiciones de descontaminación sostenible que incorporan el principio de “quien contamina paga”, así como umbrales de descontaminación que aseguran la equidad intergeneracional y promueven la restauración ecológica. Existe toda una discusión sobre las últimas tecnologías, prácticas y técnicas (para la rehabilitación de suelos, aguas superficiales y mantos freáticos contaminados con mercurio), que reducen la contaminación con mercurio y el impacto sobre la salud humana durante la descontaminación y la fase de pos-rehabilitación. Esta Guía también aborda las funciones de cooperación que se pueden adoptar entre las organizaciones de la sociedad civil, las autoridades locales o nacionales y la industria, para facilitar resultados positivos en los sitios contaminados con mercurio.

Algunos cálculos estiman que a lo largo de los últimos 300 años, se han liberado unas 250,000 toneladas de mercurio elemental al medio ambiente global como resultado directo de la minería de oro y plata, dejando un legado persistente de sitios contaminados con mercurio. Por todo el mundo, se siguen comerciando miles de toneladas de mercurio para su uso en la industria, la manufactura y la minería, resultando en una proliferación de sitios contaminados con mercurio con un impacto sobre el medio ambiente y la salud humana.

La minería aurífera artesanal y en pequeña escala (MAAPE), tanto actual como histórica, representa una fuente significativa y continua de sitios contaminados con mercurio a nivel global. Esta Guía aborda algunas de las complejidades asociadas con la identificación y definición de los sitios contaminados con mercurio debido a la MAAPE, que puede ir desde los vertederos de relaves hasta poblados, comunidades, vías fluviales y arrozales. A diferencia de muchos sitios industriales contaminados que se pueden aislar para su descontaminación, muchos sitios contaminados por la MAAPE se localizan en ambientes sociales complejos donde la salud humana puede sufrir fuertes impactos que pueden resultar exacerbados por la rehabilitación. Esta Guía orienta a los usuarios sobre cómo integrar cuestiones sociales, de salud y medioambientales en sitios relacionados con la MAAPE a través de mecanismos de involucramiento de las múltiples partes interesadas.

IPEN desarrolló este documento de lineamientos con el objetivo de proporcionar una base para que los países adopten acciones realistas sobre los sitios contaminados en sus esfuerzos por implementar el Convenio de Minamata sobre el Mercurio, reducir la contaminación con mercurio, y proteger la salud humana y el medio ambiente contra la contaminación con mercurio.

1. INTRODUCCIÓN

Este documento pretende ser una guía preliminar para la gestión de sitios contaminados con mercurio y sus compuestos. La guía incluye lineamientos para la identificación y la gestión de sitios contaminados con mercurio, así como aspectos del involucramiento de las partes interesadas, que son de importancia crítica para la gestión y rehabilitación exitosos de estos sitios. También se enfoca en las tecnologías para la rehabilitación de sitios contaminados con mercurio, tanto probadas como emergentes, así como en técnicas y prácticas que puedan asegurar que dicha rehabilitación se dé de forma ambientalmente racional.

Los sitios contaminados son resultado de una amplia gama de prácticas antropogénicas, incluyendo la actividad industrial, la minería y la eliminación de desechos. La principal preocupación al abordar sitios contaminados es la potencial amenaza a la salud humana y al medio ambiente. Los sitios contaminados pueden verse afectados por una sola sustancia o por una mezcla altamente compleja de sustancias químicas y metales, dependiendo de la fuente de contaminación. En este documento, los lineamientos se enfocan en la identificación y la gestión de sitios contaminados con mercurio.

El artículo 12 del Convenio de Minamata sobre el Mercurio, adoptado en 2013, aunque aún no ha entrado en vigor, plantea el problema de los sitios contaminados. El tratado llama a las partes a ‘procurar’ emprender acciones para abordar los sitios contaminados. El tratado especifica un número de acciones que las partes deberían realizar, incluyendo el desarrollo de lineamientos para:

- la identificación y caracterización de sitios;
- la participación del público;
- la evaluación de los riesgos para la salud humana y el medio ambiente;
- opciones para la gestión de los riesgos que representan los sitios contaminados;
- la evaluación de los costos y los beneficios;
- la validación de los resultados.

Este documento representa un esfuerzo inicial para el desarrollo de lineamientos para las diversas áreas mencionadas arriba y considera otros aspectos de la rehabilitación de sitios contaminados que complementan estos enfoques. En algunas casos, se alude a cuestiones que atraviesan el

Tratado del Mercurio y algunos de los elementos de los lineamientos del Convenio de Basilea, especialmente en relación a los lineamientos referentes a los desechos de mercurio y su gestión.

La rehabilitación de un sitio contaminado con mercurio puede involucrar un conjunto complejo de parámetros técnicos y sociales cuya resolución no es tan fácil si se utilizan las prácticas estándar de descontaminación de sitio adoptadas históricamente para otros contaminantes o para escenarios específicos. La práctica de la amalgamación del mercurio en la minería de oro artesanal y en pequeña escala (MAPE) es de particular preocupación debido a la distribución descentralizada del mercurio elemental utilizado, y su manejo generalizado, conversión térmica y eliminación en el interior de ambientes, como talleres, pueblos y áreas de producción de alimentos. La gestión de dichos sitios difiere significativamente de la rehabilitación de sitios industriales y requiere de un involucramiento más complejo y meticuloso de las partes interesadas.

Igualmente, hay diferencias importantes entre los enfoques para la gestión de la contaminación con mercurio de índole puntual y difusa, incluyendo situaciones en las que la primera puede ser responsable de la segunda. En este documento se presenta un número de estudios de caso que ilustran los desafíos de los riesgos complejos relacionados con la gestión de estas formas de contaminación.

Además, este documento también puede servir de base para una mayor discusión entre las organizaciones de la sociedad civil y las Partes del Tratado del Mercurio sobre los lineamientos adicionales que se requieren para la gestión de sitios contaminados con mercurio, para asegurar así la reducción tanto en número como gravedad de dichos sitios y limitar su impacto sobre la salud humana y el medio ambiente.

1.1 INFORMACIÓN BÁSICA SOBRE EL MERCURIO Y LOS SITIOS CONTAMINADOS

Desde hace mucho se conocen las propiedades tóxicas del mercurio elemental y en décadas recientes se ha vuelto evidente la importancia de la contaminación con mercurio a escala mundial. La contaminación de la atmósfera, los océanos, los lagos y los ríos con mercurio ha afectado la cadena alimenticia y ha llevado a una contaminación generalizada de la industria pesquera, una fuente clave de proteína para gran parte de la población mundial. En ambientes acuáticos, los organismos bacterianos convierten el mercurio metálico inorgánico en metilmercurio orgánico, que es altamente tóxico. En los organismos acuáticos, el metilmercurio se bioacumula y se biomagnifica, alcanzando altas concentraciones en los grandes depredadores, como el tiburón, el atún y el pez espada. A su vez,

el consumo humano de pescado contaminado puede llevar a una acumulación de niveles tóxicos de mercurio en los tejidos del cuerpo.

La exposición a altos niveles de mercurio puede dañar el cerebro, el corazón, los riñones, los pulmones y el sistema inmunológico de personas de todas las edades. Los altos niveles de metilmercurio en la sangre de bebés no nacidos y niños pequeños pueden dañar el sistema nervioso en desarrollo (Agencia de Protección Ambiental [EPA, por sus siglas en inglés] de Estados Unidos, 2014), lo que reduce la capacidad de pensar y aprender del niño y, potencialmente reduce su coeficiente intelectual.

Los sitios contaminados con mercurio son una importante fuente de contaminación con mercurio de origen antropogénico, debido a las propiedades físicas del mercurio, que permiten que se evapore a temperatura ambiente (con una presión de vapor a temperatura ambiente de 0.002 mm Hg), y se escape a la atmósfera, desde donde se puede depositar en ambientes acuáticos lejanos de la fuente (Rom, 1992). El mercurio de los sitios contaminados también puede tener un impacto sobre el medio ambiente local, ya que la lluvia lo arrastra hasta las vías fluviales y lo infiltra hacia los sistemas de agua del subsuelo que finalmente la lleva a los ambientes acuáticos en donde se da la metilación. Los sitios contaminados pueden representar un serio peligro para la salud de las comunidades locales, por la inhalación directa del vapor y del polvo contaminado, la exposición dérmica y la contaminación de fuentes alimenticias.

El reconocimiento mundial de la gravedad de la contaminación con mercurio ha llevado a la reciente adopción del Convenio de Minamata sobre el Mercurio,¹ el cual se abrió para su firma en octubre de 2013. Este Convenio es un instrumento legal internacional o tratado diseñado para proteger la salud humana y el medio ambiente de emisiones y liberaciones antropogénicas de mercurio y sus compuestos. El Convenio ya ha sido firmado por 128 países y ratificado por 18. El Convenio de Minamata entrará en vigor 90 días después de haber sido ratificado por 50 países. Los firmantes del Convenio de Minamata sobre el Mercurio podrán acceder a recursos internacionales para permitirles una mejor identificación y gestión de la contaminación con mercurio.

El Convenio de Minamata requiere de la eliminación gradual de muchos productos que contienen mercurio, implementa restricciones sobre el comercio y el abastecimiento de mercurio, y establece un marco para la reducción o eliminación de las emisiones y liberaciones de mercurio por parte de los procesos industriales y la minería. Bajo los artículos 11 (Dese-

1 Para mayores detalles sobre la adopción del Convenio, ver el sitio web del PNUMA <http://www.mercuryconvention.org/>

chos de mercurio) y 12 (Sitios contaminados), el Tratado aborda diferentes elementos de los sitios contaminados con mercurio.

Un tratado internacional relacionado, el Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación (Convenio de Basilea)² también proporciona lineamientos para la gestión de los sitios y desechos contaminados con mercurio. El Convenio de Basilea entró en vigor en 1992 con el objetivo general de proteger la salud humana y el medio ambiente contra los efectos adversos de los desechos peligrosos.

El Convenio de Basilea, proporciona lineamientos técnicos adicionales para la gestión de los desechos de mercurio y la contaminación con mercurio en un documento consolidado (Convenio de Basilea, 2012) que se revisó recientemente en la COP conjunta sobre convenios químicos en Ginebra (La décimo segunda Reunión de la Conferencia de las Partes (COP, por sus siglas en inglés) del Convenio de Basilea, la séptima reunión de la COP del Convenio de Rotterdam y la séptima reunión de la COP del Convenio de Estocolmo). La Conferencia de las Partes del Convenio de Basilea en mayo de 2015 adoptó la sexta revisión de los lineamientos técnicos de Basilea sobre los desechos de mercurio. La revisión más reciente contiene lineamientos más detallados sobre los desechos de mercurio y los sitios contaminados que son de relevancia para los artículos del Convenio de Minamata sobre el Mercurio. En el sitio web del Convenio de Basilea se encuentran disponibles las actualizaciones y las revisiones de los lineamientos.³

Aunque estos tratados sirven para crear conciencia sobre los sitios contaminados con mercurio y sus impactos, no contienen requisitos jurídicamente vinculantes para rehabilitar (descontaminar) los sitios contaminados con mercurio o sugerir cómo determinar quienes son las partes responsables de esta actividad. En general, la principal parte interesada en la identificación, evaluación y rehabilitación de sitios es el gobierno nacional en el contexto de la legislación y la regulación locales. Sin embargo, hay papeles de importancia crítica para otras partes interesadas en este proceso, incluyendo ONGs y las comunidades locales afectadas por los sitios contaminados. Estos grupos pueden desempeñar un papel activo en la identificación y mapeo de los sitios, en el muestreo y análisis (bajo la supervisión de autoridades calificadas y con la protección adecuada), y el desarrollo de opciones de rehabilitación, y consideraciones para el uso

2 <http://www.basel.int/TheConvention/Overview/tabid/1271/Default.aspx>

3 <http://www.basel.int/Implementation/TechnicalMatters/DevelopmentofTechnicalGuidelines/MercuryWaste/tabid/2380/Default.aspx>

del suelo posterior a la rehabilitación. A un nivel más amplio, las ONGs pueden sensibilizar a la comunidad con respecto a las fuentes e impactos de la contaminación con mercurio y las formas de reducirla.

Este documento también proporciona lineamientos sobre los principios que se pueden adoptar para abordar los sitios contaminados, independientemente del contexto nacional. Incluye una gama de sugerencias sobre cómo se pueden desarrollar las políticas, la legislación y la gestión de sitios contaminados tomando en cuenta los contextos locales, incluyendo la limitación de recursos y la diversidad cultural. Aunque toma en cuenta las cuestiones legales, regulatorias y financieras de relevancia para los sitios afectados por el mercurio, estos lineamientos establecen como prioridad la protección de la salud humana y la integridad ecológica ante los impactos de la contaminación antropogénica con mercurio que surge de los sitios contaminados.

1.2 EL CONVENIO DE MINAMATA Y LOS SITIOS CONTAMINADOS

El Convenio de Minamata sobre el Mercurio desglosa las actividades que pueden realizar las partes para abordar los sitios contaminados y generar información para crear conciencia en el público con respecto a sus implicaciones para la salud humana y el medio ambiente. Lineamientos, como este documento, pueden contribuir a fortalecer las capacidades de la comunidad, las ONGs y los formuladores de políticas para empezar a abordar los sitios contaminados con mercurio dentro de su país mientras se ratifica el tratado. Ninguna de las disposiciones del tratado excluye a los firmantes de realizar acciones tempranas para remediar los problemas de contaminación con mercurio en su país.

El artículo 12 del Convenio de Minamata sobre el Mercurio establece que *“1.Cada Parte procurará elaborar estrategias adecuadas para identificar y evaluar los sitios contaminados con mercurio o compuestos de mercurio. 2. Toda medida adoptada para reducir los riesgos que generan esos sitios se llevará a cabo de manera ambientalmente racional (...)”*. Aunque muchos países aún no han ratificado el Convenio, las autoridades ambientales nacionales se podrían beneficiar de la adopción de los enfoques sugeridos en el Convenio para identificar y evaluar los sitios contaminados con mercurio.

A estas alturas del proceso, aunque las partes del Convenio aún no han desarrollado lineamientos específicos para los sitios contaminados, esto no impide que los gobiernos nacionales desarrollen sus propios marcos,

políticas y leyes relativas a la gestión, para evaluar, identificar, caracterizar y rehabilitar sitios contaminados. También es importante conocer las declaraciones específicas realizadas en el tratado sobre sitios contaminados con mercurio y la necesidad de involucrar al público debido a que la rehabilitación exitosa de los sitios puede depender de este factor.

Aunque el Convenio aún debe desarrollar lineamientos específicos y detallados sobre la gestión de sitios contaminados con mercurio, sugiere que las actividades que se deben realizar incluyan:

- la identificación y clasificación del sitio;
- la participación del público;
- evaluaciones de los riesgos para la salud humana y el medio ambiente;
- opciones para la gestión de los riesgos que representan los sitios contaminados;
- la evaluación de los costos y los beneficios; y
- la validación de los resultados.

Además, se alienta a las Partes a desarrollar estrategias e implementar actividades para *“identificar, evaluar, establecer prioridades, gestionar, y, cuando sea necesario, rehabilitar sitios contaminados”*.

Aunque el Convenio de Minamata se enfoca específicamente en sitios contaminados con mercurio y sus compuestos, se pueden aplicar los procesos anteriormente identificados a sitios con cualquier forma de contaminación química.

Otros artículos del Convenio que pueden ser relevantes para los sitios contaminados incluyen:

- Artículo 11 – Desechos de mercurio;
- Artículo 13 – Recursos financieros y mecanismos financieros;
- Artículo 14 – Creación de capacidades, asistencia técnica y transferencia de tecnología;
- Artículo 16 – Aspectos relacionados con la salud;
- Artículo 17 – Intercambio de información;
- Artículo 18 – Información, sensibilización y formación del público;
- Artículo 19 – Investigación, desarrollo y vigilancia.

Bajo el artículo 12 “Sitios contaminados”, se requiere que la Conferencia de las Partes prepare lineamientos para la gestión de sitios contaminados que incluyan métodos y enfoques para “involucrar al público” (PNUMA, 2013).

Además, bajo el artículo 18 “Información, sensibilización y formación del público”, se requiere que cada Parte le proporcione al público información sobre la contaminación con mercurio, así como los “resultados de las actividades de investigación, desarrollo y monitoreo que se realicen de conformidad con el artículo 19”. También se requiere que las Partes proporcionen formación, capacitación y sensibilización del público en relación con los efectos del mercurio sobre la salud, en colaboración con las organizaciones intergubernamentales pertinentes, ONGs, y poblaciones vulnerables.

El involucramiento público a través de la colaboración y cooperación transversales requiere un enfoque integrado bidireccional entre un involucramiento a nivel nacional y regional de la sociedad civil alentado por el gobierno, y un proceso de involucramiento de las partes interesadas a nivel específico del sitio local. Cada proceso deberá tener la capacidad de informar y adaptarse al otro. Sin embargo, para ser más efectivo, el involucramiento público también necesita tomar en cuenta el contexto cultural, social y político específico.

Los países que aún no han ratificado el Convenio, deberán considerar los pasos necesarios para la ratificación del mismo, para mejorar el acceso potencial tanto a la asistencia técnica y a la transferencia de tecnología (artículo 14) como a los recursos financieros (artículo 13) que podrían apoyar el desarrollo de inventarios sobre el mercurio (y los desechos de mercurio), bases de datos de sitios contaminados y demás información crítica necesaria para abordar la contaminación nacional con mercurio.

2. LA IDENTIFICACIÓN Y LA CARACTERIZACIÓN DEL SITIO - ¿QUÉ ES UN SITIO CONTAMINADO CON MERCURIO?

Para desarrollar una definición robusta de lo que es un sitio contaminado con mercurio, es necesario abordar cuestiones clave, incluyendo la definición de lo que es un “sitio”, así como qué concentración o forma de mercurio presente se debe considerar como “contaminación”, en contraposición a los niveles que ocurren de forma natural.

En términos generales, un sitio cuyo suelo, aire, agua o sedimentos (o una combinación de los mismos) hayan sido afectados por mercurio elemental, compuestos de mercurio o desechos de mercurio, por lo menos deberá considerarse como un sitio bajo sospecha de estar contaminado con mercurio. Las concentraciones de solamente 0.13 ppm de mercurio en el suelo (Tipping et al., 2010) han sido identificadas como el límite tolerable para la salud del suelo en términos de las plantas y los microorganismos.

Los niveles de mercurio en el suelo que “desencadenan” investigaciones adicionales también se llaman niveles de detección. Aunque varían de un país a otro, en general, se encuentran en el mismo orden de magnitud. Como ejemplo, los lineamientos nacionales para sitios contaminados de Australia (NEPC, 1999) incluyen 10 ppm de metilmercurio y 15 ppm de mercurio elemental como un nivel de detección para propiedades residenciales. Los Niveles de Intervención de Holanda (Ministerio de Vivienda, Planeación Espacial y el Medio Ambiente de Holanda, 2010) utilizan 10 ppm de mercurio elemental como niveles de intervención para la evaluación de los sitios bajo sospecha de contaminación.⁴ En el Reino Unido, los valores de los lineamientos para el suelo de uso residencial son incluso más bajos, con un límite de 1 ppm para el mercurio elemental en el suelo y 11 ppm para el metilmercurio (Agencia para el Medio Ambiente del Reino Unido, 2009). Se utilizan estos niveles de detección en la identificación

⁴ Se revisó esta concentración en 2009 a un nivel de intervención de 36 mg/kg (ppm), pero también resalta el uso de un nivel meta de sólo 0.3 mg/kg para asegurar la salud sustentable del suelo. Para una mayor discusión del tema, ver el estudio de caso 2 de este documento.

de sitios contaminados con mercurio y pueden hacer que sea necesario la gestión del sitio y someterlo a una mayor investigación y posiblemente a rehabilitación.

Estas cuestiones pueden ser de gran complejidad. Puede que algunos sitios tengan una presencia de niveles naturales de mercurio o de compuestos de mercurio que exceda los niveles en los que se pudieran dar impactos negativos sobre la salud humana y ecológica. Frecuentemente es el caso de sitios donde ha habido o sigue habiendo minería primaria de mercurio debido a las altas concentraciones naturales de mercurio en el suelo.

En muchos países, se utilizan enfoques basados en los riesgos para definir y gestionar los sitios contaminados. Estos enfoques toman en cuenta la naturaleza del sitio (por ejemplo, si es terrestre, o acuático), su contexto (si es urbano, agrícola o natural), y la amenaza que representa la contaminación para los diferentes 'receptores', como las personas, la naturaleza y los procesos ecológicos. Este enfoque puede servir como herramienta útil para priorizar el orden en el que se deban rehabilitar los sitios utilizando recursos limitados. En general, los sitios que presentan un mayor riesgo para la salud humana y el medio ambiente se rehabilitan primero, y los de menor riesgo, se rehabilitan posteriormente. Sin embargo, puede que, a pesar de que su rehabilitación sea altamente prioritaria, la rehabilitación de sitios grandes, complejos y de alto riesgo puede tardar años o décadas debido a complicaciones financieras, legales, políticas y sociales, incluyendo conflictos sociales.

2.1 LA DEFINICIÓN DE 'SITIO'

Un sitio no necesariamente se limita a una forma terrestre, como un campo, bosque o cerro, sino que puede incluir ambientes acuáticos, como arroyos, ríos, lagos, pantanos, humedales, estuarios y bahías. En otros casos, los sitios pueden incluir formas terrestres modificadas con características tanto terrestres como acuáticas, como campos de riego, arrozales, y los estanques para la cría de peces. Al abordar la contaminación con mercurio en diferentes sitios, la identificación, caracterización, gestión y rehabilitación (descontaminación) pueden variar considerablemente cuando se toma en cuenta la forma del sitio, su uso actual y el uso pretendido después de la rehabilitación.

También es importante considerar la estructura geofísica e hidrogeológica de un sitio determinado con el propósito de caracterizar el grado de la contaminación tanto del suelo como de las aguas del subsuelo. Esto también puede ayudar a calcular o predecir el movimiento fuera del sitio y los impactos de la contaminación en los sistemas de agua subterránea en la actualidad y en el futuro, así como calcular la extensión y el tipo de rehabilitación que pueda resultar necesaria.

Los sitios terrestres contaminados con mercurio también pueden sufrir eventos naturales periódicos que pueden llevar a extender la contaminación más allá de los límites de la propiedad, como inundaciones regulares u ocasionales, terremotos y deslaves además de climas extremos, como tormentas, ciclones o huracanes, que pueden dispersar el polvo contaminado del sitio. Se deben tomar en cuenta estos eventos y se deben gestionar sus impactos, en un esfuerzos por reducir la dispersión de contaminantes desde sitios contaminados conocidos y/o sitios bajo sospecha de contaminación. Estas actividades naturales puede crear sitios contaminados con difusión de mercurio, como el que se encuentra en el Río Nura y su llanura aluvial en Kazajistán Central (ver el estudio de caso en la sección 7 de este documento). En este sitio, se descargaban, desde hace mucho tiempo, aguas residuales ricas en mercurio de una planta de acetaldéhidó (en gran medida sin ser tratadas); posteriormente estas aguas se mezclaban en el río con ceniza volante proveniente de unas centrales eléctricas. Esta acción creó limo cargado con mercurio (limo tecnogénico) que se esparció a través de las inundaciones que contaminaron grandes áreas río abajo del sitio de descarga inicial (Heaven et al., 2000).

2.2 LA IDENTIFICACIÓN DEL SITIO

La identificación de sitios contaminados proporciona una oportunidad clave para lograr el involucramiento de la comunidad y la interacción entre organizaciones de la sociedad civil y otros actores, incluyendo autoridades ambientales y de la salud. El proceso de investigación de un sitio bajo sospecha de contaminación a menudo requiere que se involucren los residentes y las autoridades locales, los trabajadores y ex-trabajadores, y las ONGs ambientales locales que pueden tener conocimientos detallados de la historia de un sitio, los desechos descartados en el sitio o transportados a otros lugares que también pueden haberse contaminado.

A través de los siguientes medios, se pueden identificar los sitios bajo sospecha de contaminación sin tener que recurrir a equipo técnico especializado (Convenio de Basilea 2012):

- la observación visual de las condiciones del sitio o fuentes de contaminación relacionadas;
- la observación visual de operaciones de fabricación u otras operaciones que se sabe utilizaron o emitieron un contaminante peligroso en particular;
- los efectos adversos observados en seres humanos, la flora o la fauna, presuntamente causados por la cercanía al sitio;
- los resultados físicos (como el pH) o analíticos que muestren los niveles del contaminante; y

- los informes provenientes de la comunidad sobre emisiones sospechosas entregados a las autoridades.

El Convenio de Minamata sobre el Mercurio incluye una gama de fuentes de contaminación con mercurio, incluyendo la fabricación de productos con mercurio agregado (Anexo A), procesos industriales (Anexo B), fuentes puntuales (Anexo D), eliminación de desechos y actividades mineras (Anexo C – especialmente la refinación de minerales y la eliminación de relaves). Se debe considerar la observación de sitios que estuvieron o están involucrados en estas prácticas como un punto de partida para la identificación y evaluación de sitios contaminados con mercurio. No todos los sitios relacionados con estas actividades resultarán contaminados, pero hay una importante probabilidad de que dichas actividades puedan haber contaminado las aguas del subsuelo, el suelo, el aire o la infraestructura, y se deberán de investigarse, especialmente si se prevé un cambio de uso del suelo a una categoría más sensible (por ejemplo, de un uso de suelo industrial a residencial).

La Minería de Oro Artesanal y en Pequeña Escala (MAPE) es una de mayores fuentes de contaminación con mercurio a nivel mundial. La MAPE se refiere a actividades de minería informal realizadas con tecnologías bajas o con maquinaria mínima. El mercurio es uno de los pocos metales que se amalgama con el oro y se le utiliza para separar el oro del mineral no refinado o concentrado. Se quema el mercurio y queda una pequeña cantidad de oro. Esta práctica provoca una dispersión generalizada de contaminación con mercurio al aire, el agua y el suelo, así como una exposición directa al mercurio por parte de los involucrados en la MAPE, sus familias y algunos comerciantes de oro que proveen mercurio o procesan parcialmente la amalgama de mercurio en sus talleres (IPEN, 2014).

En general, son actividades industriales, principalmente la minería, la ceniza de carbón de las centrales eléctricas, la producción de cloro⁵, y la fabricación de productos con mercurio añadido, las que causan sitios contaminados con mercurio. La eliminación de los productos con mercurio añadido en los rellenos sanitarios o a través de la incineración también pueden contaminar sitios con mercurio. Los desechos de la incineración de los productos con mercurio añadido, como la ceniza volante, también puede contaminar sitios si se tira la ceniza peligrosa en sitios no autorizados para ese fin.

5 La producción de cloro en plantas de cloro-álcali incluye el uso de grandes cantidades de mercurio elemental, que tiende a contaminar las instalaciones con emisiones y liberaciones al suelo, el agua y el aire. Muchas de estas plantas de producción de cloro-álcali basada en el uso de mercurio han sido sustituidas por tecnología de producción de cloro sin base de mercurio, como el método de la membrana. Sin embargo, puede que los sitios de las plantas anteriores permanezcan contaminados una vez cerradas o demolidas las instalaciones.

La identificación de la contaminación con mercurio se puede ligar íntimamente con estos tipos de actividad industrial y de eliminación de desechos. Las autoridades regulatorias de muchos países a menudo estudian la historia de un sitio específico como parte de una investigación preliminar del mismo. En esta etapa de la investigación, la información de los miembros de la comunidad en las inmediaciones del sitio, puede proporcionar detalles de importancia crítica basados en observaciones a lo largo del tiempo y conocimientos específicos sobre el medio ambiente, la ganadería y la biota locales a través de las variaciones estacionales.

Por ejemplo, puede que un ganadero local ubicado en las inmediaciones de los límites del sitio o cerca de las rutas de drenaje, detecte que sus animales están sufriendo de enfermedades no comunes, se están muriendo o están naciendo con deformidades probablemente causadas por la contaminación, o bien puede que un vecino note la presencia de pipas que salen regularmente de un sitio industrial en la noche y están tirando desechos. Puede que los residentes del lugar hayan trabajado en el sitio durante mucho tiempo como choferes, trabajadores o gerentes y estén familiarizados con las prácticas laborales, las técnicas de eliminación de desechos, y los sitios utilizados, y así puedan informar a los investigadores. Puede que las autoridades regulatorias no registren estas importantes observaciones, ya que sólo tienen un contacto breve o intermitente con el sitio donde se utiliza mercurio o sus compuestos. Las observaciones locales pueden ser muy importantes en términos de evaluar los impactos que tiene la contaminación sobre la salud de la comunidad, donde puede que los habitantes locales tengan conocimientos específicos sobre un aumento inusual de las tasas de enfermedades en su localidad y puedan comunicárselos a las autoridades. También es probable que los trabajadores locales de la salud puedan proporcionar información similar sobre las tendencias locales de la salud locales que pudieran estar señalando que hay un problema de contaminación.

Una vez que se ha identificado un sitio como sospechosos de contaminación, se deben realizar las siguientes actividades:

- una investigación preliminar del sitio (y una respuesta de emergencia si se requiriera);
- una investigación detallada del sitio;
- la gestión del sitio;
- la rehabilitación, validación y gestión continua;
- el transporte y tratamiento de los desechos (en el sitio y fuera de sitio).

2.3 LA INVESTIGACIÓN PRELIMINAR DEL SITIO

Una Investigación Preliminar del Sitio (IPS), por lo general, consiste en una revisión de la historia del sitio (estudio de escritorio), una inspección del sitio y entrevistas con las partes interesadas, y la preparación de un informe. Los resultados de la IPS ayudan a explicar cómo se contaminó el sitio y las potenciales rutas de exposición entre las fuentes y receptores de la contaminación, como las personas, las cosechas, la naturaleza o el ganado.

2.3.1 *El estudio de escritorio*

Cuando se investiga un sitio industrial, el estudio de escritorio siempre deberá buscar incluir entrevistas con trabajadores, gerentes y conductores de los camiones en los que se transportan desechos, tanto actuales como anteriores, para así ampliar la base de información sobre los puntos críticos de la contaminación tanto en sitio como fuera del sitio.

Además de las entrevistas con las partes interesadas, los investigadores pueden recurrir a:

- fotografías aéreas actuales e históricas;
- certificados históricos de las escrituras (títulos de propiedad del terreno);
- documentación del gobierno local (permisos para el desarrollo industrial o autorizaciones para abrir un relleno sanitario).

2.3.2 *La inspección del sitio*

Posteriormente, se deberá realizar una inspección del sitio en compañía de una persona que tenga conocimientos históricos del mismo. La inspección se realiza para recolectar información visual, oral y anecdótica sobre:

- la topografía;
- los cuerpos de agua superficial y la dirección del flujo;
- el tipo y las condiciones en que se encuentra el material de los pisos firmes;
- la infraestructura del sitio (tanto actual como histórica);
- las actividades actuales del sitio (e históricas en la medida que sea posible);
- el uso de suelo de los terrenos adyacentes;
- cualquier evidencia de contaminación del suelo (manchas, olores, vegetación estresada, etcétera);

- las áreas de almacenamiento de sustancias químicas y combustibles;
- la gestión de desechos.

2.4 LA INVESTIGACIÓN PRELIMINAR DEL SITIO Y LA RESPUESTA DE EMERGENCIA

Al terminar la investigación preliminar del sitio (IPS), se evalúa la información sobre la naturaleza y extensión de la contaminación del sitio por medio de una investigación detallada del sitio (IDS). Puede que la IPS revele una contaminación bruta por mercurio u otros materiales altamente peligrosos. Si la contaminación es grave y las poblaciones circunvecinas se encuentran en riesgo de exposición que resulte en una amenaza inmediata a su salud, se podrá solicitar una respuesta de emergencia antes de realizar la IDS.

La prioridad número uno es aislar la contaminación de los receptores en la medida de lo posible, para reducir cualquier futura exposición al máximo. De esta forma, los sitios contaminados con mercurio se asemejan a un sitio con cualquier otro contaminante potencialmente tóxico y ambulante (Basilea, 2012). Si no se puede controlar el sitio y el riesgo es alto, puede que se requiera proceder a la evacuación temporal de los residentes y trabajadores hasta que se pueda controlar el sitio y se haya acotado la contaminación. La volatilidad de los vapores que expide el mercurio a temperatura ambiente puede hacer que el aislamiento de los contaminantes sea una tarea difícil en sitios altamente afectados. Más adelante, en la sección referente a las tecnologías de rehabilitación, se discuten las tecnologías de barrera, como medio para reducir los vapores de mercurio de los sitios contaminados (sección 6).

En la Guía de Respuesta a Emergencias por Mercurio de la EPA (US EPA Mercury Response Guidebook for Emergency Responders, 2004), se puede encontrar información adicional sobre las respuestas de emergencia para casos de contaminación con mercurio en pequeña escala debido a derrames. Los Protocolos para la Evaluación Ambiental y de la Salud del Mercurio Liberado por Mineros de Oro Artesanales y en Pequeña Escala (Veiga y Baker, 2004) proporcionan lineamientos para cuestiones referentes a la contaminación con mercurio de sitios de mayor escala, que también se pueden aplicar a la contaminación de sitios relacionados con la industria y los desechos, en términos de las evaluaciones de la salud y los métodos de muestreo.

2.5 LA INVESTIGACIÓN DETALLADA Y CARACTERIZACIÓN DEL SITIO

La IDS involucra la toma de muestras de aire, suelo, aguas del subsuelo u otros fuentes de agua para confirmar la presencia o ausencia de contaminación identificada o sospechada en la investigación preliminar del sitio. El muestreo de la investigación detallada del sitio debe ser lo suficientemente amplia como para identificar la naturaleza de la contaminación y describir su extensión lateral y vertical a tal grado que se pueda hacer una evaluación de riesgos de la salud humana y ambiental, y sentar la base para el desarrollo de una estrategia adecuada de rehabilitación o gestión.

La evaluación de riesgos para sitios contaminados se basa en el desarrollo de un Modelo Conceptual del Sitio (MCS), que proporciona una representación de los datos referentes a la contaminación del sitio (muchas veces bajo la forma de un gráfico o mapa), y las rutas potenciales de exposición entre la contaminación sospechada o confirmada y los receptores potenciales. Este aspecto de la investigación también se puede describir como la ‘caracterización’ del sitio.

Los datos obtenidos del muestreo durante la IDS se pueden incluir en el Modelo Conceptual del Sitio para ayudar a construir una representación más completa de la contaminación en el sitio y de cómo puede afectar el medio ambiente y la salud humana. Cualquier dato de muestreo obtenido del sitio se debe someter a procedimientos de Aseguramiento y Control de Calidad, (ACC) para asegurar que los datos obtenidos sean representativos de la contaminación en el sitio (ver también Veiga y Baker, 2004, p.123 para conocer los procedimientos específicos de ACC para sitios afectados con mercurio). Esto incluye detalles sobre el almacenamiento y manejo de las muestras, tomar muestras duplicadas ciegas⁶ y los tiempos de espera de las muestras que se requieren. La integridad de la muestra y la confiabilidad de los resultados dependerá no sólo del tiempo que lleve almacenada la muestra, sino también de las condiciones de manejo, conservación y almacenamiento de la misma. Se deben realizar todas las pruebas tan pronto como resulte práctico después de tomar las muestras, y se recomienda que se haya ocupado menos de la mitad del tiempo de espera para cuando el laboratorio reciba la muestra.

El aseguramiento de la calidad (AC) se refiere al sistema general de gestión que incluye la organización, la planeación, la recolección de datos, el control de calidad, la documentación, la evaluación y el informe de las ac-

6 Para revisar la capacidad de reproducción de los procedimientos de laboratorio y de campo, y para indicar la no homogeneidad, asigne dos números (únicos) de muestra separados (un número para la muestra principal y otro para el duplicado) y entréguela ciega al laboratorio.

tividades de la IDS; mientras que el control de calidad (CC) se refiere a las actividades técnicas de rutina cuyo objetivo es, esencialmente, el control de errores. Todos los métodos de la EPA de Estados Unidos para el análisis de mercurio requieren que las muestras se refrigeren lo antes posible, y se analicen dentro de los 28 días posteriores a la recolección (Veiga y Baker, 2004).

Después de la etapas correspondientes a la IPS y de la IDS y de la construcción del Modelo Conceptual del Sitio, se puede realizar la evaluación de riesgos para la salud humana y los receptores ecológicos. En muchos casos, el resultado de la evaluación de los riesgos determina si se rehabilitará el sitio y cómo se rehabilitará (eliminación de la contaminación hasta un nivel específico) o gestionará (la contaminación permanece en el sitio con una gama de actividades de gestión). A pesar de su utilidad como una herramienta de gestión de sitios contaminados, la evaluación de riesgos no debe ser el único método a través del cual se determine el futuro de un sitio contaminado. Una vez que se ha caracterizado adecuadamente la contaminación en un sitio, deberá de haber discusiones públicas sobre su uso futuro, incluyendo si se rehabilitará el sitio y cómo. Obtener el acuerdo de la sociedad civil sobre la descontaminación y el futuro de estos sitios puede evitar la ansiedad, el conflicto y los gastos prolongados, a la vez que creará oportunidades para la renovación social en torno a sitios que pueden haber permanecido improductivos por años.

3. LA IDENTIFICACIÓN Y DETECCIÓN PRELIMINAR DEL SITIO: FUNCIÓN DEL GOBIERNO, LOS ASESORES Y LAS ONGs

En la mayoría de los países desarrollados, el proceso de identificación caracterización, evaluación de riesgos y rehabilitación de sitios lo realizan las compañías privadas de asesoría reguladas por o en cooperación con agencias gubernamentales. El proceso muchas veces se da dentro de un marco legal y regulatorio que exige estándares y acreditaciones específicas para realizar ese trabajo y para informar sobre cualquier sitio que se sospeche o se haya identificado como contaminado a una agencia que hace un inventario de los sitios y monitorea su gestión y rehabilitación.

Como parte de este proceso, se han establecido lineamientos para definir qué concentraciones de una sustancia (química o metálica, por ejemplo) en el suelo, en sedimentos, en el aire y el agua se define como perteneciente a un nivel de ‘activación’ (o concentraciones umbral) para propósito de investigaciones más extensas o formales (IPS e IDS). No todos los países desarrollan sus propios niveles de activación y eligen adoptar los de otros países. Los lineamientos usados comúnmente incluyen los Niveles Regionales de Detección de la EPA de Estados Unidos,⁷ los Valores de Intervención de Holanda,⁸ los Estándares canadienses,⁹ los Niveles de Investigación de la Salud de Australia (HILs, por sus siglas en inglés)¹⁰ y los Lineamientos de los Valores del Suelo del Reino Unido (SGVs)¹¹.

7 Ver Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos <http://www.epa.gov/region9/superfund/prg/>

8 http://www.rivm.nl/en/Documents_and_publications/Scientific/Reports/2013/januari/Proposal_for_Intervention_Values_soil_and_groundwater_for_the_2nd_3rd_and_4th_series_of_compounds

9 <https://www.ec.gc.ca/mercure-mercury/default.asp?lang=En&n=C6953AC5-1>

10 <http://www.scew.gov.au/nepms/assessment-site-contamination>

11 <https://www.gov.uk/government/publications/land-contamination-soil-guideline-values-sgvs>

Una IPS y una IDS completas pueden ser un proceso costoso si se trata de sitios contaminados que son grandes y complejos, que involucren múltiples contaminantes o actividades industriales continuas. La plena caracterización de un sitio a menudo involucra un muestreo de cuadrícula para obtener múltiples muestras las cuales se repiten estacionalmente. El costo de hacer perforaciones para sacar muestras de las aguas del subsuelo y el análisis de una multiplicidad de muestras por parte de un laboratorio especializado puede también ser muy elevado y rebasar la capacidad de las ONGs. Sin embargo, el papel clave que pueden desempeñar estas organizaciones es crear conciencia y sensibilizar sobre los sitios potencialmente contaminados a través de localizar los sitios que se sospecha están contaminados, documentando las actividades que pueden haber causado la contaminación e incluso realizar algunos muestreos simples de detección. Las ONGs también pueden hacer un inventario de sitios que se sabe o se sospecha que están contaminados, para ayudar a las autoridades regulatorias a realizar investigaciones que requieren un nivel importante de recursos.

Las ONGs que crean conciencia de la existencia de un inventario o ‘lista’ de sitios contaminados, pueden alentar a los tomadores de decisiones nacionales a abordar el tema a través de desarrollar marcos nacionales para la investigación y la rehabilitación que puedan llevar al desarrollo de marcos legales para determinar la responsabilidad de descontaminar los sitios y de alcanzar acuerdos compensatorios. Un ejemplo notorio de este tipo de acuerdo es el Superfondo de Estados Unidos (US Superfund en inglés) (EPA Estados Unidos, Región 9, 2015), que proporcionó fondos para la rehabilitación de sitios peligrosos y creó una base de datos de sitios contaminados conocidos que requieren rehabilitación.

Una vez que se ha confirmado que un sitio está contaminado con mercurio, las ONGs pueden sensibilizar a la comunidad y a las autoridades locales sobre los peligros que representan estos sitios y las medidas preventivas que se pueden tomar para reducir la exposición a la contaminación. Esto es particularmente relevante para los sitios contaminados con mercurio donde las industrias pesqueras (especialmente río abajo de la contaminación) son una fuente de alimentos y podrían contener niveles elevados de metilmercurio (MeHg). Igualmente, otras formas de muestreo indirecto pueden revelar fuentes localizadas de contaminación, como líquenes, pescados, crustáceos, y algunas plantas comestibles.

3.1 TRABAJO DE DETECCIÓN EN EL SITIO (MUESTREO)

El muestreo de detección directo en el sitio (suelo, agua y aire) en sitios bajo sospecha de contaminación, o el muestreo indirecto de fuentes alimenticias cercanas, como la vegetación, los peces, las aves o muestras

biológicas humanas pueden proporcionar fuertes indicadores de la presencia de sitios contaminados y la ruta de migración de los contaminantes que salen del sitio.

También se pueden tomar muestras biológicas si las personas que viven o trabajan en las proximidades de un sitio contaminado se ofrecen como voluntarios para proporcionarlas. Hay que abordar este proceso con sensibilidad, ya que hay que tomar en cuenta consideraciones de privacidad y ética, incluyendo cómo apoyar y asesorar a los individuos en caso que el muestreo detecte altos niveles de exposición. Las muestras más comunes que se pueden proporcionar que pudieran informar sobre si hay exposición al mercurio incluyen cabello, orina y sangre. A menudo se recurre inicialmente a las muestras de cabello porque son menos invasivas que los otros métodos y resultan relativamente económicas de analizar. La metodología del muestreo de cabello se describirá más adelante.

3.2 EL MUESTREO INDIRECTO

Para sitios bajo sospecha de estar contaminados con mercurio, se pueden hacer detecciones en el suelo y el aire de forma eficiente a un costo relativamente bajo. Las muestras de pescados, son útiles para una detección indirecta ya que se pueden comparar tanto con una población control de pescado que se sabe que no está contaminada proveniente de otras áreas, así como con dosis de referencia conocidas que establecen el nivel permisible de mercurio metilado en el pescado que se puede consumir por mes. La EPA de Estados Unidos ha establecido lineamientos para el consumo mensual de 0.22 ppm de metilmercurio (EPA Estados Unidos, 2001).

La Comisión Europea y la Organización Mundial de la Salud recomiendan que no se venda pescado con un nivel que exceda 1 ppm de mercurio. Como en el caso del muestreo de dioxina en huevos, leche y pescado, se debe contactar a laboratorios certificados para que realicen el análisis, y también puedan ayudar con instrucciones sobre cómo tomar, manejar y almacenar las muestras, además de los tiempos permisibles de espera. Si los resultados demuestran que las muestras de pescado exceden la dosis de referencia del metilmercurio, se requerirá profundizar la investigación para identificar la fuente de la contaminación.

En los *Protocolos del Proyecto Mundial de Mercurio para la Evaluación Ambiental y de la Salud del Mercurio Liberado por los Mineros de Oro Artesanal y en Pequeña Escala* (GEF/UNDP/UNIDO, 2004 p86) se encuentra amplia información sobre el muestreo en campo de pescado para detectar su nivel de metilmercurio.

3.3 EL MUESTREO DE CABELLO PARA DETECTAR LA EXPOSICIÓN AL MERCURIO

Tomar muestras de cabello para el análisis de mercurio puede proporcionar un indicador de la contaminación continua y localizada con mercurio. El nivel de la dosis de referencia de 1 ppm de mercurio en cabello de la EPA de Estados Unidos establece un umbral contra el cual se pueden comparar muestras de cabello de trabajadores locales o miembros de la comunidad para verificar si existen niveles elevados de mercurio.

Las personas puede estar expuestas al mercurio a través de numerosas fuentes industriales y mineras, incluyendo centrales eléctricas de carbón y molinos de pulpa de papel y papel, además de sitios industriales mixtos que contienen mezclas de producción de cloro-álcali, refinamiento de petróleo, incineración de desechos, fabricación de cemento y otras fuentes potenciales de mercurio. Se tiene que tomar en cuenta todo esto cuando se analiza si los niveles elevados de mercurio en el cabello vienen de un sitio local contaminado o de fuentes más difusas. Las muestras de cabello de niños se pueden usar para evaluar si hay una presencia de mercurio a niveles preocupantes que pudieran afectar su desarrollo neurológico y permitir así la intervención temprana de las autoridades para reducir la exposición (Grandjean, 1999).

El Instituto Nacional de Enfermedades de Minamata, Japón, recomienda el siguiente proceso para la toma de muestras de cabello (independientemente de que otros métodos también pueden ser válidos).

3.4 LA RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE CABELLO

- Cortar el cabello con tijeras cerca de la raíz. Se requiere un mínimo de 20 cabellos, de 10 cm de largo cada uno. Mientras más corto sea el cabello, se requerirán más. Si hubieran cabellos más largos, se deberá conservar una porción proximal del cabello (del lado de la raíz) con cerca de 10 cm de largo, eliminando el lado distal excesivo (del lado de la punta) después de haber cortarlo los cabellos completos.

Nota: Para el análisis de una muestra de cabello con el fin de calcular la exposición al metilmercurio es más adecuada la porción proximal del cabello (del lado de la raíz) que la parte distal (del lado de la punta). La razón es que bajo ciertas condiciones, incluyendo el ondulado artificial de cabello, es probable que el contenido de metilmercurio baje durante el crecimiento del cabello.

- Colocar la muestra de cabello en un sobre indicando el número de la identificación oficial del participante. Utilizar un sobre por cada participante.

3.5 EL ENVÍO DE LAS MUESTRAS DE CABELLO RECOLECTADAS

- Recolectar y almacenar las muestras de cabello hasta que haya más de 50 participantes y enviarlas con una lista de participantes. El número de participantes no debe ser más de 100 por cada sitio de muestreo.
- La lista de participantes debe incluir el número de identificación oficial, el sexo, la edad, la fecha y sitio del muestreo.

Nota: Se deberá proteger la información personal del participante, incluyendo el nombre y la dirección, que pudiera llevar a su identificación. Esta información debe estar bajo el estricto control de un administrador específico. En ciertos casos, pudiera ser necesaria la información personal, por ejemplo, cuando se necesita darle retroalimentación a la comunidad local sobre los resultados del análisis.

3.6 EL MUESTREO DIRECTO (EN SITIO)

ONGs con cierta capacitación preliminar y bajo supervisión, pueden tomar muestras de suelo, sedimentos y agua directamente de un sitio que se sepa que está contaminado o bajo sospecha de estar contaminado. Sin embargo, también es importante estar conscientes de los peligros de exposición presentes en dichos sitios y de la necesidad de contar con un Equipo de Protección Personal (EPP) adecuado, para reducir los riesgos de exposición. También es preferible tomar un conglomerado de muestras más representativas del suelo o de sedimentos de un área más grande que tan solo muestras de un punto, ya que se pudieran pasar por alto puntos críticos y la caracterización del sitio podría ser inadecuada.

Es de crucial importancia contar con un protocolo de muestreo que incluya una descripción detallada del proceso de muestreo. Deberá incluir una descripción del equipo y métodos de muestreo, la ubicación de cada muestra (de preferencia identificando las coordenadas de latitud y longitud por medio de una herramienta del sistema de información geográfica, SIG), notas sobre la apariencia y olor de la muestra y la justificación del muestreo (por ejemplo, si se trata de una línea de drenaje de una planta de cloro-álcali). Si se utilizan patrones de cuadrícula para el muestreo, se deberán determinar los intervalos de la cuadrícula con base en los estándares nacionales o internacionales adecuados y se les deberá documentar.

Una técnica para detectar la contaminación con mercurio en un sitio bajo sospecha de contaminación sin alterar el material potencialmente contaminado (minimizando así la exposición), es el uso de ‘inhaladores’ (“sniffer” en inglés) de mercurio.



Imagen 1. Ejemplo de un investigador de un sitio contaminado que utiliza un analizador portátil de vapores de mercurio. Fuente: www.mercury-instrumentsusa.com

Los ‘inhaladores’ son dispositivos electrónicos portátiles que pueden detectar niveles elevados de mercurio en el sitio en el campo. Algunos están calibrados para detectar mercurio en el suelo u otros objetos sólidos, mientras que otros están calibrados para detectar vapores de mercurio. Algunos dispositivos se pueden adaptar con equipos adicionales para hacer pruebas del suelo, el agua y el aire para determinar si contienen mercurio.

Los dispositivos portátiles incluyen, aunque no se limitan a:

- Analizador X-MET 200 Metal Master Analyser de Metorex, Analizador Fluorescente de Rayos X
- Analizador de Mercurio Directo de Milestone Inc. (DMA-80), aparato de termólisis
- Analizador de Elementos Múltiples Serie XL-700 de NITON, Analizador Fluorescente de Rayos X (dispositivo XRF)
- Analizador Portátil de Mercurio RA-915+ de Lumex, Espectrómetro de Absorción Atómica, accesorio del aparato de termólisis RP 91C
- Instrumento Manual PDV 5000 de MTI, Inc., Voltimetría de Reducción Anódica
- Analizador de la fluorescencia de rayos X portátil Olympus Delta



Imagen 2. El analizador de fluorescencia de los rayos X portátil Olympus Delta con ejemplo de lectura de pantalla digital para metales en polímeros. Fuente: www.innovx.com

Estos dispositivos portátiles son particularmente útiles para tomar lecturas rápidas de puntos múltiples en un sitio determinado que pueden ayudar a la ubicación de puntos críticos.

El analizador fluorescente de rayos X que se muestra arriba (ver Imagen 2) es un ejemplo de un analizador de muestras sólidas (suelo, objetos) que se puede programar con diferentes paquetes de software para analizar bienes de consumo y medios ambientales, como el suelo. Se coloca el dispositivo cerca del objetivo y se le activa. El análisis en partes por millón aparece entonces en la pantalla. Este tipo de dispositivo se especializa en metales pesados, pero también puede detectar otras sustancias químicas si se le calibra de manera correcta.

Para detectar vapores de mercurio en un sitio contaminado, puede ser efectivo un dispositivo como el analizador 'Lumex' (ver Imagen 3). Estos dispositivos pueden ser caros, pero en muchos países se pueden rentar por diferentes periodos de tiempo.

En muchos países, el papel de las ONGs en la realización del muestreo del sitio a nivel de la detección inicial ha probado ser muy efectivo para crear



Imagen 3. Analizador de vapores de mercurio portátil Ohio Lumex RA915+ RA915+ que también se puede adaptar para tomar muestras del suelo y el agua. Fuente: ohioalumex.com

conciencia sobre los sitios contaminados y estimular a las autoridades a abordar la contaminación de estos sitios. Ya sea que se recurra a una simple prueba de cabello, o a un uso más complejo de dispositivos inhaladores, existen muchas opciones que las ONGs consideran para identificar sitios contaminados afectados por mercurio y otros metales.

3.7 EL MUESTREO DEL SUELO Y EL AGUA PARA UN ANÁLISIS DE LABORATORIO

A quienes pretendan tomar muestras de suelo o agua de un sitio bajo sospecha de estar contaminado, para llevarlas a un laboratorio para que las analice, se les recomienda que antes de tomar las muestras consulten a un laboratorio certificado que utilice métodos de análisis reconocidos internacionalmente. Ellos les asesorarán sobre el protocolo correcto para tomar las muestras, incluyendo cuál es el tipo correcto de contenedor que se deberá utilizar para almacenar las muestras. Son importantes estos detalles ya que algunos materiales para la toma y almacenaje de muestras (plásticos y metales) pueden contaminar las muestras y dar una lectura falsa. En algunos casos, los laboratorios proporcionarán contenedores para las muestras que han sido preparados de antemano para asegurar que no se dé una contaminación cruzada inadvertida de las muestras. También les asesorarán sobre los tiempos de retención de las muestras y

cualquier necesidad de refrigeración o congelamiento de las muestras (en el caso del pescado, por ejemplo).

4. LA EVALUACIÓN DE RIESGOS

La evaluación de riesgos (ER) de sitios contaminados es un componente importante para determinar la exposición de receptores humanos y ambientales, y tomar la decisión de gestionar o rehabilitar un sitio o no. La evaluación de riesgos también puede proporcionar una herramienta útil para establecer prioridades en la rehabilitación de numerosos sitios contaminados con base en aquellos que representan un mayor riesgo. Esta sección da un breve visión general de los principios básicos de la evaluación de riesgos y dirige al lector hacia lineamientos amplios para quienes apliquen la evaluación de riesgos a sitios contaminados con mercurio.

Los modelos de evaluación de riesgos pueden tener importantes limitaciones y muchos de los valores asignados como insumos para los modelos pueden involucrar un cierto juicio de valor por parte de quien los aplique. Otra limitación de los modelos pueden ser los datos toxicológicos que tradicionalmente se han basado en el análisis de compuestos de una sola sustancia química y las características de relación dosis-efecto.¹² Puede que un sitio contaminado se vea afectado por una sola sustancia química o un solo metal, pero más comúnmente se ve afectado por un conjunto de metales y contaminantes, sobre todo si se ha utilizado el sitio para tirar una mezcla de desechos.

En algunos casos cuando hay una mezcla de sustancias químicas en un sitio, puede que la toxicidad desarrolle efectos sinérgicos por medio de los cuales la toxicidad total de la mezcla es mucho más grande que la suma de la toxicidad de las partes. Aunque los modelos tradicionales de evaluación de riesgos a menudo no representan adecuadamente la potenciación de la toxicidad de algunas sustancias químicas por parte de otras, se está trabajando para resolver este problema. Sin embargo, considerando que actualmente se producen más de 100,000 sustancias químicas (Winder et al., 2004), un análisis completo de todas las interacciones potenciales dentro de un marco tradicional de evaluación de riesgos, seguirá siendo un desafiante proyecto a largo plazo que pudiera ser superado por otras técnicas de evaluación.

Como una alternativa a la evaluación cuantitativa de los riesgos de las mezclas, se están investigando cada vez más los bioensayos como un determinante del impacto toxicológico de las fuentes de contaminación. Los

12 Una relación dosis-efecto describe cómo la probabilidad y la gravedad de tener efectos adversos sobre la salud (las respuestas o efectos) se relacionan con la cantidad y condición de la exposición a un agente (la dosis proporcionada).

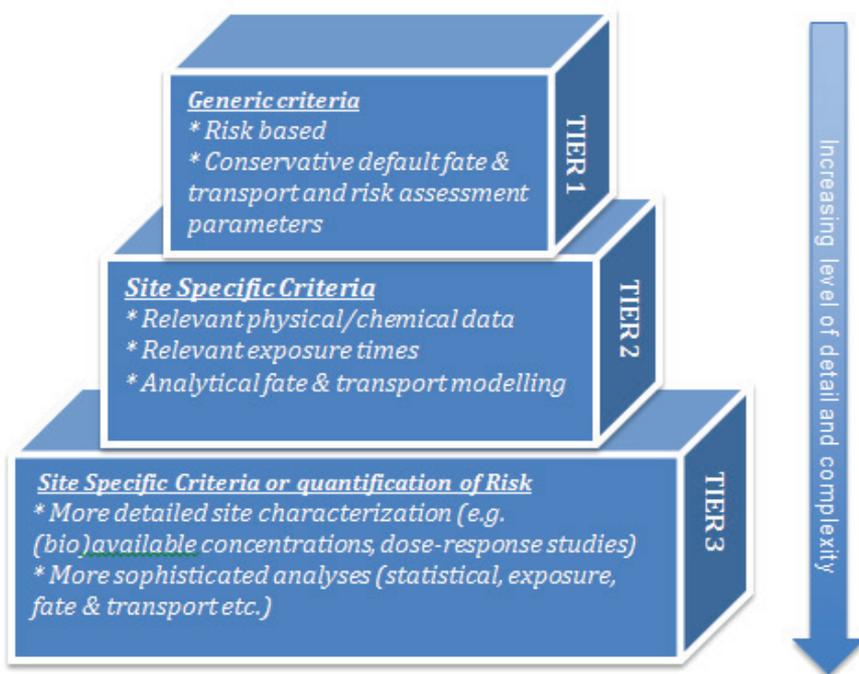


Imagen 4. Las tres capas en la evaluación de riesgos del suelo contaminado. Los pasos pueden diferir de un país a otro según los marcos de evaluación de riesgos que se utilicen. Fuente: Ohlsson et al 2014

bioensayos son una prueba que se utiliza para evaluar la potencia tóxica relativa de una sustancia química a través de evaluar el efecto que tiene sobre un organismo vivo. En términos de pruebas ambientales, los bioensayos dan una evaluación completa de la toxicidad total de un efluente o de una muestra de agua, sedimentos o suelo de un sitio contaminado. Existe una gama de lineamientos disponibles para quienes estén considerando utilizar procedimientos de los bioensayos para complementar la evaluación de riesgos o mejorar la evaluación y caracterización de aguas contaminadas (enHealth, 2012), suelos contaminados (Hooper, 2008), y sedimentos contaminados (Barcelo y Petrovic, 2006).

Es posible realizar la evaluación de riesgos de los sitios contaminados con mercurio con los modelos existentes, pero están sujetos a limitantes importantes que podrían subestimar el potencial de exposición de los receptores de manera significativa. El problema principal es la falta de especiación específica del sitio y de cálculos de la biodisponibilidad específica de las sustancias en los modelos actuales. La biodisponibilidad puede variar entre diferentes formas de mercurio y compuestos relaciona-

dos, y se puede definir como 'la fracción de un compuesto en una matriz que, cuando se libera de la matriz, puede ser absorbido por un organismo. Este compuesto absorbido está entonces disponible para causar un efecto biológico' (Stein et al., 1996). Un ejemplo típico es cuando se encuentran altos niveles de mercurio en el pescado aunque no hayan niveles elevados de mercurio en los sedimentos del sitio donde se atrapó el pescado.

Los modelos tradicionales de evaluación de riesgos tienen un enfoque menos definido, ya que utilizan datos de la concentración total de insumos y suponen coeficientes fijos para el impacto real sobre el receptor para desarrollar el perfil de riesgo de un sitio en un momento específico y suponen una situación estable (EPA de Estados Unidos, 1996).

5. LOS ENFOQUES PARA LA GESTIÓN Y LA REHABILITACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS

Esta sección aborda los diferentes enfoques a la gestión y rehabilitación de sitios contaminados con mercurio. Se enfoca en los sitios industriales contaminados del tipo que se esperaría de la actividad industrial tanto actual como anterior en Europa y Estados Unidos, aunque se trata de información que también se puede aplicar a otros países.

La producción de cloro en las plantas de cloro-álcali que utilizan el proceso de cátodo de mercurio ha sido una fuente importante de contaminación con mercurio debido a las grandes cantidades de mercurio involucradas en el proceso de producción, la pérdida de emisiones fugitivas en la etapa de vapor y los derrames, las fugas y la eliminación de desechos.

Aunque las plantas de cloro álcali son una fuente importante de contaminación industrial, otras actividades, como la conservación de madera (HgCl_2), la fabricación y reciclaje de baterías, y otras actividades manufactureras, como la producción de termómetros y de interruptores eléctricos, potencialmente podrían causar contaminación con mercurio. En la sección 7.2 de este documento, se discute más a fondo un ejemplo de contaminación por mercurio puntual en una fábrica de termómetros.

Los procesos industriales que utilizan catalizadores basados en mercurio pueden causar la contaminación en el sitio y afectar a otros sitios por medio de la eliminación de desechos. La producción de petróleo y gas natural también es una fuente de mercurio, ya que el mercurio elemental se retira de las plantas de producción y refinerías, para proteger el equipo de la corrosión.

La eliminación de desechos (desechos sólidos, lodos y liberaciones de efluentes) provenientes de las operaciones industriales son la causa de muchos sitios contaminados con mercurio. El río Nura y su llanura aluvial inundable en Kazajistán Central se contaminó con mercurio cuando se descargó la efluente contaminada de una planta de acetaldehído en el río. Esto ha llevado a impactos río abajo con contaminación de pescado del río Nura con metilmercurio. A su vez, esto ha llevado a niveles elevados de

mercurio en los residentes de Temirtau, quienes pescan y comen pescado del río Nura (Sir, 2015a).

Además de la efluente de acetaldehído, una fábrica de hule sintético en Termirtau descargó entre 2000 y 3000 toneladas de mercurio en el río Nura y áreas cercanas, lo que contribuyó más a la contaminación generalizada por mercurio en el valle de Nura, lo cual potencialmente podría afectar la salud de decenas de miles de personas que utilizan el agua del río, los pozos y le dan otros usos al Nura para la irrigación agrícola, darle agua de beber al ganado, la natación y la pesca (Sir, 2015a). En la sección 7 se detalla un estudio de caso de este sitio.

En algunos casos, siguiendo la evaluación de riesgos y/o otras deliberaciones, se podría decidir que se debería de gestionar y no rehabilitar un sitio contaminado. Esto puede implicar contener la contaminación de mayor concentración en el sitio, cercar el sitio y poner señalizaciones para advertir a la gente del peligro, además del monitoreo regular del sitio por medio de la observación visual y de instrumentos técnicos (como los ‘inhaladores’ de vapores de mercurio) para asegurarse de que no aumenten los niveles de exposición. En la mayoría de los casos en que las aguas del subsuelo se ve amenazadas, se deben establecer perforaciones de monitoreo (pozos) ‘tanto río arriba como río abajo’ en términos de flujos hidrogeológicos para muestrear y caracterizar la potencial dispersión de los contaminantes. Todos estos datos se deben revisar por lo menos una vez al año, para asegurar que la contaminación siga contenida.

Independientemente de que se decida gestionar o rehabilitar el sitio, se deberá evitar la contaminación adicional de un sitio que se sabe está contaminado. Además, la gestión o rehabilitación de un sitio contaminado conocido no debe provocar la creación o proliferación de otros sitios contaminados (a través de tiraderos de desechos, la eliminación de los materiales contaminados provenientes de las perforaciones, aguas residuales, etcétera).

Por lo general, por razones económicas, se elige la gestión de los sitios cuando no hay recursos suficientes disponibles para una rehabilitación plena. Sin embargo, en algunos casos alterar la contaminación por medio de un proceso de rehabilitación puede causar más daño ambiental que dejarla en el sitio. En algunos casos, se ha informado que dragar los sedimentos contaminados con mercurio ha afectado los ambientes acuáticos, causando elevados niveles de mercurio en la biota río abajo (Anchor Environmental, 2003). En caso de ser posible hacer una rehabilitación completa, la gestión de la contaminación en sitios residenciales no debe ser la opción preferida.

5.1 LA GESTIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS

Las estrategias de gestión de sitios contaminados deben reflejar la necesidad de proteger todos los segmentos del medio ambiente, tanto biológicos como físicos. Durante la evaluación y rehabilitación de los sitios, se deben tomar acciones para controlar las emisiones al aire, al suelo y al agua.

El mercurio puede presentar dificultades especiales debido a su tendencia a evaporarse a temperatura ambiente. Esto incluye el riesgo de que se liberen vapores cuando se alteran sedimentos cargados de mercurio, se procede a la demolición de edificios contaminados con mercurio y se excavan pozos de prueba.

Las perforaciones para monitorear las aguas del subsuelo puede también crear rutas para la liberación de vapores de mercurio provenientes de la contaminación del subsuelo. En cualquier sitio alterado se debe realizar con regularidad un monitoreo cuidadoso con detectores de vapores de mercurio, para asegurar la seguridad de los trabajadores, de las personas que viven en las inmediaciones, o de miembros del público en general.

No debe realizarse la descontaminación si existe la probabilidad que el proceso tenga un efecto adverso mayor que dejar el sitio como está. Esta decisión debería revisarse a la luz de las nuevas tecnologías o estrategias de descontaminación disponibles a lo largo del tiempo, o si se nota que el riesgo va en aumento debido a la movilización de los contaminantes más allá del sitio o de las estructuras de confinamiento.

5.1.1 El monitoreo

Si se determina que un sitio está contaminado, pero las circunstancias, o la evaluación de riesgos, llevan a tomar la decisión de gestionarlo en vez de rehabilitarlo, se debe desarrollar e implementar un plan de monitoreo.

La investigación detallada del sitio debería de haber caracterizado la geología, la hidrogeología y la hidrología del sitio, para así contribuir a la evaluación de riesgos y a las opciones de gestión y/o rehabilitación.

Para los sitios contaminados con mercurio (y aquellos afectados por los compuestos orgánicos volátiles, o COVs) el monitoreo debe incluir el monitoreo de los vapores enfocando en las áreas relevantes de los sitios identificados por medio de una encuesta de gas del suelo, que debe haberse realizado durante la investigación detallada del sitio. Esto aplica únicamente al mercurio elemental, ya que el monitoreo del vapor no detecta sales mercúricas o mercurosas, cuya solubilidad hace que representen un riesgo para las aguas del subsuelo.

El monitoreo de las aguas del subsuelo, es también de importancia crítica para monitorear el movimiento o crecimiento de la pluma del contaminante, incluyendo aquella que se precipita por los efectos del descenso del nivel del agua debidos a las perforaciones y pozos fuera del sitio utilizados para la producción de agua, lo que puede influir sobre el movimiento de las plumas contaminadas fuera de las direcciones del flujo natural.

En términos generales, durante la investigación detallada del sitio se debe realizar el monitoreo de pozos o perforaciones tanto ‘río arriba’ (en términos del agua del subsuelo) como ‘río abajo’ de la contaminación, para así ayudar con la caracterización hidrogeológica y la delimitación de la contaminación de las aguas del subsuelo. Una vez que se ha caracterizado la pluma de la contaminación clasificado a través del muestreo y de la construcción de modelos, se deberán hacer más perforaciones ‘río abajo’ más allá de donde haya avanzado la pluma, para detectar su dispersión y calibrar su movimiento en relación al modelo anterior. Así se podrán ir ajustando y evaluando las suposiciones sobre el movimiento de la pluma para ver las implicaciones a nivel de los riesgos. Existen métodos internacionales para el monitoreo del mercurio en aguas del subsuelo, como la norma internacional ISO 17852 – 2006 sobre la calidad del agua.

5.2 LOS PRINCIPIOS Y ENFOQUES DE LA REHABILITACIÓN

El objetivo fundamental de la rehabilitación debería ser dejar un sitio en condiciones aceptables y seguras para poder seguir dándole el uso actual a largo plazo, y maximizar en la medida de lo posible sus usos futuros.

La rehabilitación compleja debe ser apoyada por el desarrollo e implementación de un Plan de Acción para la Rehabilitación (PAR). Los componentes clave de un PAR son:

- la identificación de las partes interesadas clave y sus responsabilidades;
- el desarrollo de metas de rehabilitación y criterios de aceptación de la descontaminación;
- la evaluación de las opciones de rehabilitación y la determinación de la opción preferida;
- la documentación de la metodología de la rehabilitación, incluyendo cualquier requisito de permiso o licencia.
- el desarrollo de un Plan de Gestión Ambiental.
- la definición del programa de validación para demostrar la conclusión exitosa de la rehabilitación, incluyendo el monitoreo (EPA de Tasmania, 2005).

UNA JERARQUIZACIÓN DE OPCIONES PREFERIDA PARA LA REHABILITACIÓN Y GESTIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS

- El tratamiento del suelo en el sitio, de forma que se destruya el contaminante o se reduzca el peligro asociado a un nivel aceptable sin efectos adversos sobre el medio ambiente, los trabajadores, la comunidad cercana al sitio o el público en general.
- El tratamiento del suelo excavado fuera del sitio de forma que se destruya el contaminante o se reduzca el peligro asociado a un nivel aceptable, para posteriormente regresarlo al sitio sin efectos adversos sobre el medio ambiente, los trabajadores, la comunidad cercana al sitio o el público más amplio.

Si no fuera posible implementar ninguna de las dos opciones mencionadas, otras opciones a considerar incluyen:

- El traslado del suelo contaminado a un sitio aprobado, seguido del reemplazo con un relleno limpio.
- Aislamiento de la contaminación en el sitio, la cual será contenida en instalaciones diseñadas de manera adecuada, y gestionada, con monitoreo y revisión regular de las estrategias de rehabilitación a lo largo del tiempo.
- Dejar el material contaminado en el sitio, siempre y cuando no implique un peligro inmediato para el medio ambiente o la comunidad, y el sitio tenga instalados controles adecuados de gestión. Esto requiere de una re-evaluación de las medidas de rehabilitación a lo largo del tiempo, para tomar en cuenta el desarrollo de nuevas tecnologías y prácticas de rehabilitación que se pudieran implementar.

5.2.1 El enfoque de ‘apto para su uso’

Si se confirma la contaminación del sitio y ésta representa un riesgo persistente para la salud humana y/o el medio ambiente, se debe realizar la rehabilitación. El término rehabilitación, por lo general, se refiere a la eliminación y/o el tratamiento de la contaminación para reducir la exposición humana y los riesgos a la salud o al medio ambiente. En algunos países, se utiliza un enfoque de ‘apto para su uso’, en el que el sitio se descontamina hasta cierto nivel, dependiendo del uso futuro propuesto para el sitio. Los sistemas regulatorios para los sitios contaminados a menudo clasifican los usos de los sitios en las siguientes categorías:

- residencial
- parques y recreación
- comercial
- industrial.

Este sistema se basa en el potencial de exposición de los receptores humanos, especialmente la duración de la exposición. Los escenarios de exposición determinan entonces los niveles permisibles de contaminación para una categoría de uso de sitio determinada. En términos generales, para el uso de suelo 'residencial' sólo se permiten los niveles más bajos de contaminación del suelo de todas las categorías, debido a que potencialmente los habitantes tienen tiempos prolongados de exposición (de hasta 24 horas al día), y a que potencialmente puede haber menores de edad en el sitio que sufran un desorden alimenticio conocido como 'pica' (Edward et al., 1997), que literalmente significa comer pequeñas cantidades de tierra al llevarse la mano a la boca.

A veces los cálculos de la exposición incluyen un escenario en el que los habitantes consumen alimentos cultivados en casa, lo cual es especialmente importante en cuanto al mercurio para quienes consumen pescado y verduras producidos en casa. Esto se vuelve particularmente importante cuando se toman en cuenta los sitios de la MAPE, los cuales muchas veces rebasan los límites del 'sitio', desde la ubicación de la mina hasta la refinación de los minerales y el amalgamamiento del mercurio se dan en poblados cercanos a estanques de pesca y arrozales (que muchas veces funcionan también como estanques de pesca). Aunque desde hace mucho tiempo se tiene conocimiento de la acumulación de metilmercurio en el pescado, cada vez hay mayor evidencia de la acumulación de mercurio en el arroz. Esto plantea la cuestión compleja de cómo abordar la contaminación con mercurio en el contexto de las actividades de la extracción de oro artesanal y en pequeña escala, especialmente en el sureste de Asia, donde la producción de alimentos basados en arroz y pescado se da al lado de la amalgamación del mercurio y el oro, en el contexto de la vivienda misma de los artesanos.

Los niveles permisibles de contaminantes son más elevados para el rubro de 'parques y recreación', son más elevados aún para el uso 'comercial' y los niveles permisibles más altos son, por lo general, para sitios que actualmente son de uso 'industrial' o bien se tiene planeado usarlos para actividad industrial en el futuro. Se permite un mayor nivel de contaminación en los sitios de uso comercial o industrial bajo la suposición de que los trabajadores estarán expuestos un número limitado de horas al día, de paso puede que, por razones ocupacionales, usen Equipo de Protección

Personal y puede que las superficies del sitio estén selladas con asfalto o concreto, lo cual limitaría las exposiciones aún más.

Este enfoque no sólo está determinado por una evaluación de riesgos, sino también por un enfoque de costo/beneficio en el que puede que los sitios industriales no se les exija el mismo grado de rehabilitación que el requerido para un sitio residencial (lo cual implica un ahorro importante para los dueños del sitio o para otras partes responsables). El problema con este enfoque es que no enfrenta la contaminación en el momento y posterior a la gestión o rehabilitación, dejándola incluso para futuras generaciones. No es ni preventivo ni sustentable; tampoco es una buena práctica a ser reproducida, aunque sí es económicamente benéfico para quienes tienen la responsabilidad de rehabilitar el sitio.

Este enfoque puede también llevar a problemas ambientales. Por ejemplo, puede que las autoridades reguladoras decidan que un sitio residencial deberá rehabilitarse al punto en el que haya 2 ppm o menos de mercurio elemental en el suelo, mientras que pueden permitir la rehabilitación de un sitio industrial muy contaminado, dejando hasta 200 ppm de mercurio elemental en el suelo. Es poco probable que el sitio residencial contribuya a la emisión de cantidades significativas de vapores de mercurio o que estas se filtren hacia el aire ambiental o el medio ambiente local, mientras que el sitio industrial continuará contribuyendo emisiones fugitivas durante muchos años y potencialmente causará la migración del mercurio a las aguas del subsuelo. En el peor de los escenarios, podrán pasar muchas décadas y se podrán perder u olvidar los registros de contaminación en el sitio, y se volverá a desarrollar el sitio como un sitio residencial, repitiendo así el ciclo de exposición a la contaminación.

Existe el problema adicional de los costos futuros de descontaminar plenamente sitios que sólo se han rehabilitado parcialmente. Es probable que en el futuro los costos sean más elevados, y que con el tiempo la contaminación se disperse, aumentando el alcance, el gasto y la extensión de la futura rehabilitación del sitio, especialmente si se cambia el uso del suelo a un escenario más sensible, como el uso residencial.

El enfoque alternativo es rehabilitar un sitio por completo cuando surja la oportunidad, para evitar el costo, los inconvenientes y los riesgos de una rehabilitación repetida en el sitio en años futuros. En cuanto a la sustentabilidad ecológica (los principios de la equidad intergeneracional, de que quien contamina paga y la prevención) este enfoque se acerca más a lo que sería una buena práctica.

Una vez que se considera que la rehabilitación de un sitio contaminado está completa, se requieren pasos adicionales para asegurar la eficiencia de la operación.

5.3 LA VALIDACIÓN

Después de la rehabilitación, se debe demostrar que se cumplieron los objetivos de la rehabilitación en términos de las concentraciones del contaminante en el suelo, el agua y el aire, y de la integridad de la contención. El sitio debe de dejar de representar un riesgo para la salud humana o el medio ambiente. Se debe realizar una toma de muestras para la validación del suelo, de las aguas del subsuelo, los sedimentos, la biota y los vapores para asegurar que se han cumplido las metas. El muestreo de las aguas del subsuelo se deberá continuar durante un tiempo para tomar en cuenta las variaciones estacionales y otras influencias.

Los planes de monitoreo continuo también deben incluir un plan de contingencia para abordar cualquier falla de la rehabilitación y la aparición de informes inesperados de contaminación en los datos de monitoreo que puedan haber surgido debido a una caracterización deficiente, por la existencia de puntos críticos clave desconocidos o por influencias fuera del sitio.

6. LA TECNOLOGÍA Y LAS TÉCNICAS DE LA REHABILITACIÓN

La tecnología de la rehabilitación de sitios contaminados con mercurio debe lidiar con algunos desafíos singulares relacionados con el comportamiento complejo y las características del mercurio elemental y los compuestos del mercurio. En particular, la capacidad del mercurio para evaporarse a temperatura ambiente, así como la capacidad de algunas especies de mercurio de atravesar el suelo.

Cuando se implementa la rehabilitación de un sitio contaminado con mercurio es de importancia crítica evaluar y gestionar la movilización del mercurio por debajo de la superficie del suelo, y evitar emisiones y liberaciones al aire, al agua y al suelo.

Cuando se considera la selección de tecnología y el desarrollo de una estrategia de rehabilitación para un sitio, se deben abordar tres cuestiones clave:

1. El desarrollo de un modelo conceptual integral del sitio que incluya una investigación detallada del sitio que describa las potenciales liberaciones de mercurio del sitio como resultado de utilizar tecnología de rehabilitación, así como cualquier transformación que pueda producir la tecnología (como transformar el mercurio de un estado sólido a vapor). Esto depende de la identificación precisa de las **especies de mercurio** potencialmente involucradas en el aire, el suelo, y el agua, y el potencial riesgo que implican para la salud humana y el medio ambiente.
2. No se puede destruir el mercurio elemental, así que cualquier estrategia de rehabilitación debe tomar en cuenta la gestión de los desechos residuales del mercurio, incluyendo su estabilización, transporte y eliminación final.
3. Las tecnologías de rehabilitación implican el riesgo de volver a movilizar el mercurio durante los trabajos de rehabilitación. Los planes de rehabilitación de la salud y la seguridad para los trabajadores y el público en general deben tomar esto en cuenta. Para información adicional, ver la sección 8.

Como se ha notado anteriormente en este documento, los enfoques de rehabilitación basados en los riesgos pueden llevar a resultados muy diferentes a los objetivos de una rehabilitación sustentable en los que se

infiere la integración de principios de sustentabilidad en las metas de rehabilitación propuestas.

Un enfoque de rehabilitación sustentable incorpora consideraciones sociales, ambientales y económicas en la descontaminación del sitio, incluyendo el principio de que quien contamina paga y de equidad intergeneracional. Un enfoque estrictamente basado en los riesgos, como el que propone Eurochlor (2009) se enfoca en consideraciones de índole económico. Sin embargo, existe la necesidad de desarrollar un enfoque de rehabilitación sustentable que promueva objetivos sociales que se podrán relacionar e integrar con metas sociales para la mejora de la salud, resultados educativos, formas de vida alternativas (especialmente relacionados con los sitios de extracción de oro artesanal y en pequeña escala) y el desarrollo del sector agrícola y pesquero que se entretengan con metas sociales más amplias enfocadas en la reducción de la pobreza.

6.1 LA CONTAMINACIÓN PUNTUAL Y DIFUSA

En términos de la contaminación con mercurio, la aplicación de estrategias y tecnologías de rehabilitación también deben responder a la forma en la que se distribuye la contaminación. La contaminación puede ser *puntual* (como la que se encuentra en una anterior planta de cloro álcali) o bien puede asumir las características de una contaminación *difusa* donde el mercurio se ha extendido mucho más allá de su punto de ori-

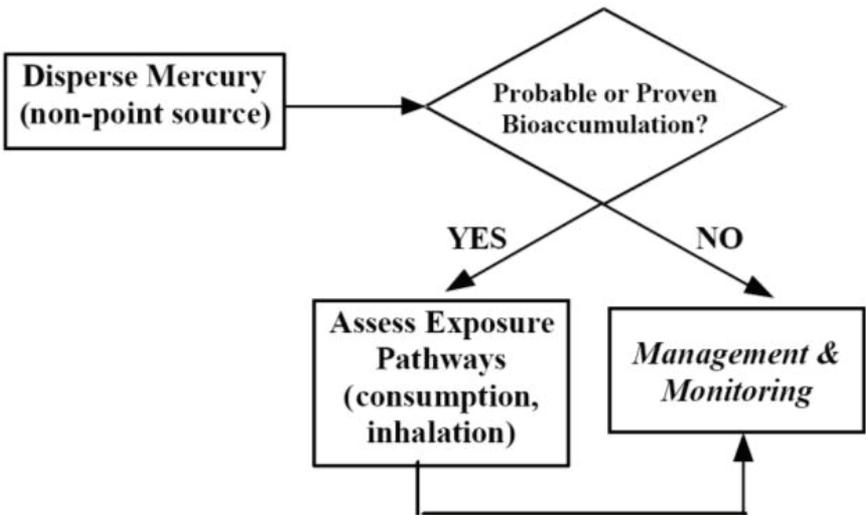


Imagen 5. Respuesta a la contaminación difusa con mercurio propuesta por Hinton et al. (2001)

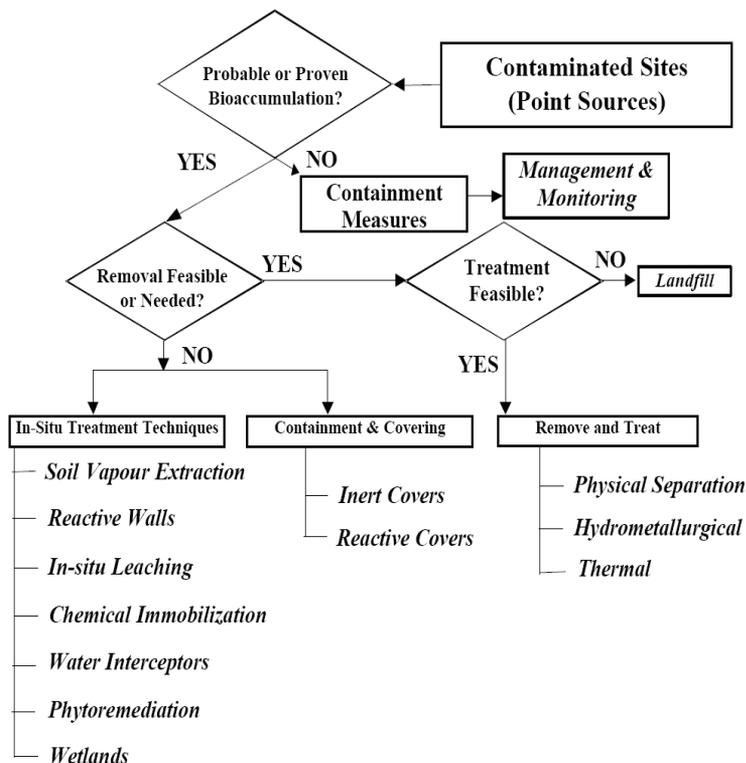


Imagen 6. Respuesta a la contaminación puntual con mercurio propuesta por Hinton et al. (2001)

gen debido a que se ha descargado hacia ambientes acuáticos, como ríos o arroyos, y, subsiguientemente, se ha depositado en las orillas de ríos, reservorios o estuarios.

Hinton *et al.* (2001) sugieren dos respuestas que dependen de si la contaminación con mercurio es puntual o difusa. Para la contaminación difusa, Hinton sostiene que las medidas de rehabilitación típicamente no son factibles.

Para la contaminación puntual, la respuesta de Hinton es considerar la posibilidad de ‘excavar y tirar/tratar’, y donde no se pueda, proponer evaluar la posibilidad de recurrir a las técnicas de contener la contaminación en el sitio y cubrirla. En ambos casos, Hinton considera la biodisponibilidad del mercurio como el factor que lleva a promover la implementación de estrategias de rehabilitación. En ausencia de un enfoque de rehabilitación a la contaminación difusa con mercurio, se podría implementar la modificación del comportamiento basada en los riesgos. Esto puede

involucrar proporcionar información pública para reducir la exposición a suelos y sedimentos contaminados con mercurio, reducir o evitar el consumo de biota contaminada (especialmente pescado), cambiar el uso de suelo (en casos de uso agrícola del suelo, por ejemplo), para evitar áreas de contaminación elevada. Las respuestas también pueden involucrar monitorear la salud de la población con intervenciones sanitarias para los individuos afectados.

Más recientemente se han desarrollado tecnologías emergentes que podrían tener el potencial de abordar la contaminación difusa, como la fito-rehabilitación. Se trata de un proceso por medio del cual se siembran plantas en las áreas contaminadas para que acumulen mercurio en las raíces o en las hojas y retoños, y después se cosechan.

La fito-rehabilitación a veces se le conoce como fito-estabilización, fito-extracción o fito-volatilización, ya que las plantas también pueden volatilizar el mercurio al medio ambiente (Wang et al., 2012). Un asunto clave con esta tecnología es cómo abordar el material residual (las plantas cosechadas contaminadas con mercurio) para asegurar que no se vuelva a movilizar el mercurio (a través de la quema de las plantas, por ejemplo), o que no se consuma como producto alimenticio.

Existen numerosas tecnologías que se pueden aplicar para la contaminación puntual con mercurio. Se pueden utilizar de forma individual o en trenes de tratamiento. Se ha probado un número de tecnologías y se les implementa de manera regular para la contaminación del suelo y el agua, mientras que otras se consideran tecnologías emergentes, con diversos grados de potencial para ambos medios ambientales.

6.2 LAS TECNOLOGÍAS DE REHABILITACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON MERCURIO COMPROBADAS

6.2.1 Excavación y tratamiento en el sitio (recuperación)

Este enfoque elimina las concentraciones más altas de contaminación del suelo por medio de la excavación y el tratamiento seguido por procedimientos de aislamiento, como la contención en el sitio y el sellado para masas de alta concentración (para evitar la liberación de vapores). El material de alta concentración también se puede retirar del sitio para depositarlo en un relleno sanitario de desechos peligrosos.

Se prefiere utilizar este enfoque para puntos críticos en un sitio contaminado, ya que la excavación generalizada implica importantes problemas de seguridad, costo y geotécnica. El problema más importante relacionado con este enfoque es la re-movilización del polvo contaminado con mercurio y los vapores de mercurio (la lluvia puede deslavar las tierras contami-



Imagen 7. Rehabilitación con recinto con control de olores y tren de tratamiento. Fuente: Gobierno Federal de Australia (2013)



Imagen 8. Interior del recinto con control de olores durante la excavación. Fuente: Gobierno Federal de Australia (2013)

nadas con mercurio del sitio durante la excavación o bien causar filtración de desechos mercúricos solubles por el suelo). Se deben tomar en cuenta los peligros que implica este enfoque para los trabajadores y las personas que se encuentra en las inmediaciones del sitio.

No se debe presuponer que los sitios contaminados son espacios vacíos, ya que puede que sigan instaladas las estructuras de los usos industriales u otros usos que se les pueden haber dado. La demolición de estas edificaciones, así como las excavaciones, pueden provocar grandes liberaciones de vapores de mercurio. Las estructuras y los materiales de las construcciones también puede contener concentraciones sustanciales de mercurio, de ahí la necesidad de contar con investigaciones detalladas y precisas del sitio, además de modelos conceptuales del mismo, antes de iniciar los trabajos principales.

Un método para reducir el riesgo de liberaciones y emisiones de mercurio durante la excavación es realizar la actividad al interior de una estructura temporal sellada bajo presión negativa de aire con una barrera para los receptores externos. La imagen que se muestra abajo (**IMAGEN 7**) presenta un recinto de presión negativa de aire (señalado por el círculo negro) que se utilizó en Nueva Gales del Sur, en Australia durante la rehabilitación del sitio ocupado por una gasera con contaminantes volátiles (Gobierno Federal de Australia, 2013). El recinto con control de olores (RCO) de 3,800 metros cuadrados de acero y tela se erigió en el lado norte del sitio de Platypus.

Los trabajos de tratamiento del material contaminado se dan en el interior del RCO. Todo el aire proveniente del interior del RCO se filtra a través de un sistema de control de emisiones antes de ser liberado al medio ambiente por medio de un tiro de chimenea (el tren de tratamiento de los vapores y el tiro la chimenea están señalados por el círculo blanco).

6.2.2 Tratamiento posterior a la excavación (lavado y separación del suelo)

Lavado y tratamiento previo del suelo: La mayoría de las formas de mercurio tienen una alta afinidad con los suelos finos y los sedimentos con altas tasas de adsorción de arcilla y materiales húmicos (orgánicos). La separación física de suelos de grano fino contaminados con mercurio de arenas gruesas y grava reduce considerablemente la cantidad final de material que se necesita contener. La separación física es un proceso de entre 3 y 5 etapas que involucra la separación física (incluyendo la mecánica) por medio del tamizado, cribado, y el lavado del suelo ya sea con agua o soluciones de lavado a base de ácidos, polímeros y surfactantes (Merly y Hube, 2014).

Una vez concluido el lavado o separación del suelo, se puede proceder a realizar un tercer paso del tratamiento basado en procesos térmicos.

6.2.3 Los procesos de tratamiento térmico

Los procesos de tratamiento térmico para eliminar el mercurio del suelo dependen de la aplicación de calor y una presión reducida para liberar el mercurio por medio de la volatilización debido a su baja presión de vapor de 0.002 mm Hg a 25 °C (ATSDR 1999). La incineración de desechos de mercurio no se considera aplicable para la rehabilitación de sitios contaminados, debido al alto riesgo que implica la liberación de vapores de mercurio.

La mayoría de los métodos de tratamiento térmico requieren de una cuidadosa consideración antes de implementarse, debido a que provocan que el mercurio adopte la forma de vapor. Las emisiones producidas por estas tecnologías pueden implicar un peligro significativo y se requiere de costosos controles de la contaminación del aire (CCA). Incluso con una aplicación integral de CCAs, las emisiones de mercurio pueden resultar difíciles de controlar.

Una vez que se elimina la contaminación de su posición original (ex situ), se puede tratar por medios térmicos ya sea en el sitio o bien fuera de él. Las tecnologías que se utilizan más extensamente son:

- la desorción térmica ex situ o DTES, (en la sección de tecnologías emergentes, se describe un método in situ);
- la incineración;
- la volatilización por lotes.

La desorción térmica se puede realizar de dos formas: a) como desorción térmica indirecta, y b) como desorción térmica directa.

La desorción térmica indirecta – La desorción térmica indirecta se debe considerar como la opción preferida para los sitios contaminados con mercurio. Característicamente, se aplica calor al exterior de la cámara de calentamiento, el cual se transfiere a través de la pared de la cámara al material de desecho. Ni la flama del quemador, ni los gases de combustión entran en contacto con el material de desecho o la emisión de gases (Agencia Ambiental del Reino Unido, 2012) con lo cual se evita la contaminación de los gases que se emplean para el calentamiento.

Esto es importante para el tratamiento de las matrices contaminadas con mercurio, ya que los productos de la combustión del quemador se pueden descargar directamente a la atmósfera, siempre y cuando se utilice un combustible “limpio” como gas natural o propano. El objetivo de la des-

orción térmica debe ser maximizar la recuperación de los contaminantes volatilizados por la emisión de gases a través de los procesos de condensación. Un principio operativo clave que diferencia la desorción térmica de la incineración de desechos se basa en la recuperación optimizada de los contaminantes desorbidos del gas, en lugar de su destrucción por medio de la combustión (Agencia Ambiental del Reino Unido, 2012).

La desorción térmica directa – No se recomienda este proceso para la rehabilitación de la contaminación con mercurio, ya que hay un alto riesgo de emisiones fugitivas de mercurio durante el proceso. Sin embargo, sí se le ha aplicado a algunos sitios en el pasado. Se aplica calor directamente por medio de la irradiación proveniente de una llama de combustión y/o por convección del contacto directo con los gases de la combustión. Los sistemas que emplean este tipo de transferencia de calor se conocen como sistemas de desorción térmica *por contacto directo o accionados directamente* (Gobierno de Estados Unidos, 1998).

El objetivo de la operación también es maximizar la recuperación de los contaminantes volatilizados de la emisión de gases por medio de procesos de condensación. Sin embargo, surge una complejidad adicional debido al contacto directo de los gases de combustión con los vapor residuales, lo cual aumenta el costo del tratamiento del sistema de emisión de gases. Las emisiones de vapores de mercurio pueden ser inaceptablemente altas en sistemas que no cuentan con niveles muy elevados de control de la contaminación del aire (CCAs). Incluso cuando se incorporan CCAs con tecnología de vanguardia y se siguen rigurosas evaluaciones de impacto ambiental (EIA) y procedimientos regulatorios, puede resultar difícil controlar las emisiones de mercurio.

Un ejemplo reciente es la falla de emisiones de una unidad de Desorción Térmica calentada Directamente (DTD) construida específicamente para destruir los desechos de mercurio de un sitio contaminado de la compañía de productos químicos Orica, en Sídney, Australia. A pesar de que se aseguraba que la operación era segura, la planta violó los límites de emisiones de mercurio al aire y fue objeto de sanciones. En una serie de muestras de aire ambiental, la Agencia de Protección Ambiental de Nueva Gales del Sur registró un nivel de mercurio de 0.0049 gramos por metro cúbico, más del doble del límite legal de Australia de 0.002 gramos por metro cúbico. Es probable que el límite de emisiones de mercurio se haya estado violando por espacio de hasta un mes antes de que fuera descubierta. La planta de desorción térmica directa se cerró después de la violación del límite emisiones y Orica posteriormente recibió una multa de \$750,000 dólares por esta y otras violaciones al reglamento referente a los niveles máximos de contaminación.¹³

13 Ver: <http://www.epa.nsw.gov.au/epamedia/EPAMedia14072901.htm>

La volatilización por lote - Los hornos de retorta característicamente funcionan a temperaturas de entre 425 y 540°C al vacío, para aumentar la volatilización del mercurio y reducir los volúmenes de emisión de gases (EPA Estados Unidos, 2007). Típicamente, se les utiliza para cantidades más pequeñas de suelos contaminados con una alta concentración de mercurio (>260 ppm) y se limitan a un procesamiento de entre 1 y 2 toneladas al día (Merly y Hube 2014).

La incineración - La incineración es un proceso de destrucción que utiliza la combustión térmica a temperaturas elevadas para destruir contaminantes, sobre todo compuestos orgánicos. Como elemento, el mercurio no se puede destruir, pero cuando se le expone a un ambiente de combustión, es muy probable que pase a un estado de vapor o se adhiera a las emisiones de partículas. La incineración no es una tecnología adecuada para el tratamiento de desechos de mercurio debido al alto potencial que tiene de liberar vapores de mercurio. El riesgo de las liberaciones de vapores de mercurio es inaceptablemente alto, sobre todo cuando se someten a tratamiento suelos y sedimentos contaminados cercanos a comunidades. Se puede utilizar una gama de tecnologías menos costosas y menos complejas que tienen un perfil de riesgo mucho menor. Por lo tanto, la incineración *no* se considera aplicable a grandes volúmenes de material contaminado, debido a las potenciales emisiones y liberaciones de mercurio que implica (Merly y Hube, 2014).

6.2.4 La excavación y las tecnologías de inmovilización (excavación y eliminación)

Este método se ha descrito en la literatura como un proceso de ‘excavar y tirar’ al que se le ha añadido un tratamiento de inmovilización. Los desechos eliminados se pueden contener en el sitio bajo sellado, o bien puede ser eliminados fuera del sitio en un relleno sanitario para desechos peligrosos. La inmovilización del contenido de mercurio se refiere al tratamiento que reduce significativamente su capacidad para lixiviarse en forma soluble o producir vapores. Las técnicas de inmovilización incluyen:

- la amalgamación (con otros compuestos metálicos);
- la estabilización (por lo general, por medio de reacciones químicas con compuestos de azufre y polímeros);
- la solidificación (la estabilización física a través de la mezcla con materiales sólidos no peligrosos).

6.2.5 La amalgamación

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (2007) define la amalgamación *como la disolución y solidificación del mercurio en otros*

metales, como cobre, níquel, zinc y estaño, resultando en un producto sólido no volátil. Es un subconjunto de tecnologías de solidificación y no involucra una reacción química. Se utilizan dos procesos genéricos para amalgamar mercurio en desechos: el reemplazo acuoso y el no acuoso. El proceso acuoso requiere mezclar un metal base finamente dividido, como el zinc o el cobre, en una agua residual que contenga sales de mercurio disueltas; el metal base reduce las sales mercúricas y mercurosas a mercurio elemental, el cual se disuelve en el metal para formar una aleación sólida de metal basada en mercurio llamada amalgama. El proceso no acuoso involucra mezclar polvos de metal finamente divididos en mercurio líquido de desecho, formando una amalgama solidificada.

La EPA de Estados Unidos ha identificado la amalgamación como la mejor tecnología disponible que ha demostrado su efectividad para el tratamiento del mercurio elemental líquido contaminado con materiales radioactivos. Esto es una consideración importante a tomar en cuenta cuando se están desarrollando planes de rehabilitación para sitios con una mezcla de contaminantes que incluyen mercurio y radionúclidos.

6.2.6 La estabilización y la solidificación sin recuperación de mercurio

Los procesos de estabilización involucran reacciones químicas que pueden reducir la movilidad del desecho, y, en algunos casos, su toxicidad. La solidificación puede cambiar las propiedades físicas de un líquido o lodo a un sólido, pero no cambia la forma química del desecho. Combinadas, estas técnicas pueden reducir la toxicidad y movilidad del desecho. Comúnmente, se aplica la estabilización y la solidificación a suelos, lodos, cenizas y líquidos contaminados (Convenio de Basilea, 2012). La estabilización y la solidificación consisten en unir o encerrar físicamente los contaminantes dentro de una masa estabilizada (solidificación) o bien en inducir reacciones químicas entre el agente estabilizador y los contaminantes para reducir su movilidad (estabilización).

El proceso de solidificación requiere de mezclar el suelo o los desechos contaminados con aglutinantes como cemento Portland, cemento polimérico de azufre, aglutinantes de sulfuro y fosfato, polvo de horno de secado de cemento, resinas de poliéster o compuestos de polisiloxano para crear un lodo, pasta u otro estado semi-líquido al que se le da tiempo para curarse en forma sólida (EPA de Estados Unidos, 2007).

Los desechos se pueden encapsular de dos formas: a través del micro encapsulamiento y del macro encapsulamiento. El micro encapsulamiento es el proceso de mezclar los desechos con el material de revestimiento antes de que se dé la solidificación. El macro encapsulamiento se refiere al proceso de verter el material de revestimiento sobre y alrededor de la

masa de desechos, encapsulándola en un bloque sólido (EPA de Estados Unidos, 2007).

La conversión química más común es dosificar los desechos con azufre para crear sulfuro de mercurio. Se debe lograr la conversión de todo el mercurio en sulfuro de mercurio (HgS) para reducir la lixiviación y la volatilidad a niveles aceptables. En general, se produce HgS a través de mezclar mercurio y azufre bajo condiciones ambientales durante un tiempo determinado, hasta producir sulfuro de mercurio (II). Puede que se necesite aislar los desechos del medio ambiente por medio del encapsulamiento y la eliminación en un relleno sanitario especializado, o bien almacenarlos de manera permanente bajo la tierra, ya que los niveles elevados de cloro en el lixiviado pueden aumentar la liberación de mercurio (Convenio de Basilea, 2012). Las elevadas condiciones de cloruro típicamente se encuentran en rellenos sanitarios municipales que no son aptos para la eliminación de esta forma de desechos.

Bajo ciertas circunstancias, el HgS se puede reconvertir en mercurio elemental. Si se pretende convertir los desechos de mercurio elemental en HgS, para su eliminación permanente, se debe reconocer que en algún momento del futuro se podría revertir este proceso.

6.2.7 La estabilización/solidificación de los polímeros de azufre

El proceso de estabilización de polímeros ofrece la ventaja adicional de que es difícil de revertir, lo cual evita la recuperación del mercurio elemental desde la matriz. El proceso de estabilización/solidificación de los polímeros de azufre¹⁴ consiste en dos pasos: el mercurio se estabiliza con azufre como el primer paso para formar sulfuro mercurio beta (polvo de metacinnabrio: López *et al.*, 2010, López-Delgado *et al.*, 2012), y, en un segundo paso, este sulfuro de mercurio se incorpora y micro encapsula en una matriz polimérica de azufre a 135°C, obteniendo un líquido que se enfría en moldes a temperatura ambiente, para obtener bloques sólidos (monolitos).

El segundo paso del proceso proporciona una barrera adicional para el mercurio para prevenir y evitar las liberaciones de mercurio al medio ambiente, reduciendo con esto la posibilidad de su conversión en otras formas de mercurio. El mercurio se transforma durante el proceso, el cual tiene bajo consumo de energía, bajas emisiones de mercurio, cero consumo de agua y cero efluentes, además de que no genera otros desechos (Convenio de Basilea, 2012).

¹⁴ Para información adicional: www.ctndm.es

6.2.8 La estabilización/solidificación con microcementos de azufre

El tratamiento de los desechos de mercurio con microcementos de azufre es otra tecnología de estabilización y solidificación que resulta en una matriz sólida que asegura el confinamiento del mercurio debido a su precipitación bajo la forma de compuestos altamente insolubles, como los óxidos, los hidróxidos y los sulfuros.¹⁵

6.2.9 La contención *in situ*

Se trata de un proceso para crear un aislamiento del área contaminada con mercurio a partir de entornos no contaminados e incluye el sellado para evitar la liberación de vapores. Las barreras físicas se diseñan de forma que puedan evitar la re-movilización del mercurio de forma lateral y vertical (ya sea a través del suelo o del aire). Existen muchas variedades diferentes de contención basadas en diferentes técnicas, incluyendo la instalación de muros pantalla verticales o cortinas fraguadas (también llamados muros de contención hechas a través de hacer trincheras profundas en el suelo alrededor de la contaminación y llenándolas con un fraguado como bentonita/cemento y mezclas de suelos.

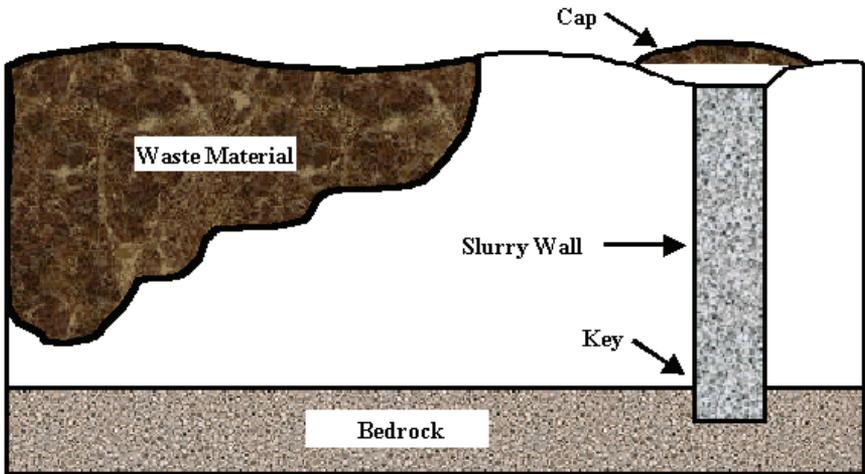


Imagen 9. Corte que muestra el aislamiento del muro pantalla sellado.

Los beneficios de este enfoque incluyen su relativa sencillez y su rápida implementación, con una reducción del costo en comparación con la exca-

15 Para información adicional: info@cementinternationaltechnologies.com; www.cemintech.com.



Imagen 10. Combinación de trinchera e inserción de fraguado.

Fuente: www.dewindonepasstrenching.com

vación (y los peligros relacionados con la excavación). El aislamiento por medio del sellado, las barreras de vapor y los muros de contención también permiten el control y la gestión de la migración del mercurio. Este enfoque tiene sus limitaciones, en tanto que no se reduce la toxicidad ni la masa del mercurio, puede que se altere el flujo de las aguas del subsuelo y existe la probabilidad de que se generen desechos contaminados durante la excavación de la trinchera (Merly y Hube, 2014). La efectividad a largo plazo de dicha contención también puede requerir monitoreo y dichos mecanismos pueden no ser aptos para áreas con gran actividad sísmica.

6.2.10 La eliminación fuera del sitio

Los desechos y residuos de mercurio provenientes de la rehabilitación de sitios contaminados que se eliminan fuera del sitio, deben cumplir con los criterios tanto de los permisos reglamentarios, como de la aceptación regional y/o nacional, para que el centro de desechos los reciba. En términos generales, esto no se aplica al mercurio elemental recuperado de procesos como la desorción térmica indirecta o la volatilización. Bajo el Convenio de Minamata sobre el Mercurio, el mercurio elemental es un producto que se puede comercializar para un uso permitido (con la excepción del mercurio recuperado de anteriores instalaciones de cloro-álcali y producido por la minería primaria para ciertos usos). Sin embargo, en algunas ju-

risdicciones, como Estados Unidos y la Unión Europea, se pueden aplicar restricciones para la exportación de mercurio elemental.

Con respecto a los desechos de mercurio, los marcos regulatorios europeos cuentan con criterios relativamente estrictos para la aceptación de instalaciones para desechos – La Directiva Europea 1999/31/EC y la Decisión 2003/33/E; la Decisión del 14/11/2008 1102/2008 y la Directiva EC 2011/97/CE.

La eliminación de desechos de mercurio fuera del sitio tiene sus desventajas, como el alto costo de la excavación y transporte a sitios de eliminación (y el potencial tratamiento previo para cumplir con los criterios de aceptabilidad del sitio de eliminación). En términos de su sustentabilidad, esto también puede crear una alta huella de carbono para el proyecto, sobre todo cuando se transportan grandes volúmenes.

La siguiente tabla proporciona los límites de lixiviado de mercurio proveniente de desechos de diversos tipos de centros de eliminación de desechos (rellenos sanitarios) que van desde rellenos de desechos inertes hasta rellenos de desechos peligrosos.

VALORES LÍMITE DEL LIXIVIADO DE MERCURIO PARA DIFERENTES TIPOS DE RELLENOS SANITARIOS, DE ACUERDO CON LA DECISIÓN 2003/33/EC, ANEXO

Tipo de relleno sanitario	L/S =2 l/kg mg/kg de sustancia seca	L/S =10 l/kg mg/kg de sustancia seca	CO (prueba de percolación) mg/l
Criterios para rellenos sanitarios para desechos inertes	0.003	0.01	0.002
Criterios para residuos granulares no peligrosos aceptados en la misma celda que residuos peligrosos estables no reactivos	0.05	0.2	0.03
Criterios para residuos peligrosos aceptables para rellenos sanitarios para residuos no peligrosos	0.05	0.2	0.03
Criterios para residuos aceptables para rellenos sanitarios para residuos peligrosos	0.5	2	0.3

Fuente: *BiPro (2010) Requirements for facilities and acceptance criteria for the disposal of metallic mercury.*

6.2.11 La eliminación en el sitio

Típicamente se eliminan los residuos y el suelo contaminados que quedan después del tratamiento para rehabilitar un sitio contaminado con mercurio en el sitio por medio del enterramiento. Se trata de una celda diseñada específicamente para aislar el desecho contaminado con mercurio del medio ambiente. Tiene la ventaja de ahorrar los costos de transporte a una instalación fuera del sitio.

Las características clave del ‘entierro’ incluyen una base de cemento o arcilla compacta de baja permeabilidad que incorpora revestimientos sintéticos, como polietileno de alta densidad, sellado, extracción y captura de gases. Se le diseña para evitar el escape de gases, la filtración del agua pluviales, la filtración de aguas del subsuelo, y la movilización de los contaminantes. Existen costos importantes asociados con el monitoreo a largo plazo de la estructura para asegurar su integridad y la contención de la contaminación. Esta estructura también depende de la estabilidad sísmica.

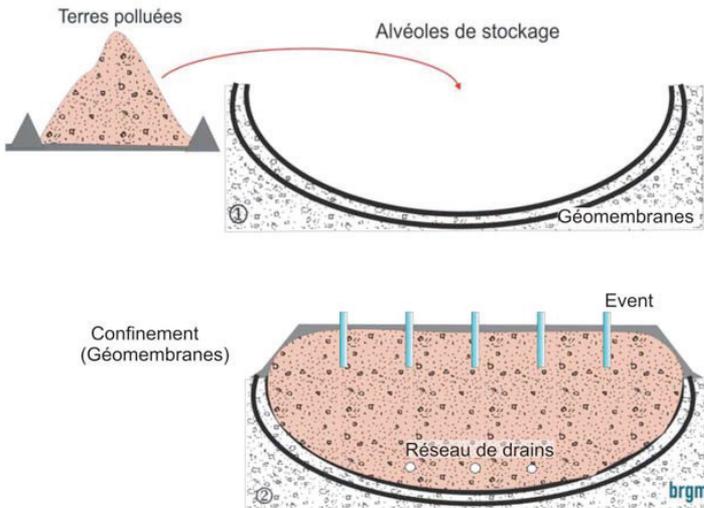


Imagen 11. Esquema de un enterramiento de desechos en el sitio. Fuente: Colombano et al (2010)

6.3. LAS TECNOLOGÍAS EMERGENTES PARA LA REHABILITACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON MERCURIO

6.3.1 Las técnicas electrocinéticas

En la literatura se utilizan diferentes términos para describir las técnicas basadas en un mismo principio: rehabilitación electrocinética, extracción electrocinética, electro reclamación, electro restauración o electrodiálisis. Tres fenómenos de transportación son responsables del movimiento electrocinético del mercurio en el suelo. Al mecanismo de transportación de cualquier partícula de mercurio con superficies cargadas, Hg^0 o precipitados coloidales, por ejemplo, se le denomina electroforesis. A través de la electromigración, se pueden transportar todas las especies iónicas al cátodo o al ánodo. Se pueden transportar las especies tanto cargadas como no cargadas que se encuentran presentes en el líquido contenido en la porosidad del suelo hacia el cátodo a través de la electro-ósmosis (Merly y Hube 2014).

La electro rehabilitación de suelos contaminados con mercurio, facilitada por el uso de agentes complejantes (EDTA) probó ser un tratamiento alternativo atractivo para la eliminación del mercurio de suelos mineros contaminados con mercurio (Robles et al., 2012) (García-Rubio et al., 2011). La incorporación de agentes complejantes permitió la formación de complejos de coordinación que fortalecen la electro-migración. García-Rubio et al., (2011), demostraron que para un suelo con permeabilidad hidráulica relativamente baja, la rehabilitación electrocinética enriquecida con yoduro, permite la misma eficiencia de recuperación que la descarga en el sitio con la óptima concentración de quelación, aunque la plena rehabilitación se podría lograr en periodos de tiempo varias órdenes de magnitud más cortos.

6.3.2 La fito-rehabilitación

La fito-rehabilitación se basa en plantas para eliminar, transferir, estabilizar o destruir los contaminantes en el suelo, los sedimentos y las aguas del subsuelo. La fito-rehabilitación se puede aplicar a todos los procesos biológicos, químicos y físicos que están bajo la influencia de las plantas (incluyendo la rizósfera) y que ayudan a descontaminar sustancias contaminadas. Se pueden utilizar plantas en la rehabilitación de un sitio, a través tanto de la mineralización de compuestos orgánicos tóxicos como de la acumulación y concentración de metales pesados y otros compuestos inorgánicos del suelo en brotes aéreos.

Se puede aplicar la fito-rehabilitación *in situ* o *ex situ* a suelos, lodos, sedimentos, otros sólidos o aguas del subsuelo (EPA de Estados Unidos, 2012). Hay estudios continuos sobre la efectividad de técnicas de fito-rehabilitación que utilizan plantas para desprender el mercurio del suelo y medios ambientales mezclados, como los arrozales. Esto podría tener una aplicación directa a áreas de la extracción de oro artesanal y en pequeña escala, donde el arroz y el pescado (que a menudo coexisten en el mismo arrozal) son la fuente principal de alimentación y están sujetos a contaminación con mercurio debido a la actividad de la extracción de oro artesanal y en pequeña escala. También puede ser útil en áreas agrícolas sujetas a descargas periódicas donde se depositan los sedimentos contaminados en áreas bajas.

Estudios comparativos han demostrado que tanto el arroz genéticamente modificado, como el arroz silvestre logran eliminar iones de Hg^{+2} cuando se les cultiva en un medio hidropónico al que se le agregó mercurio (Meagher y Heaton, 2005). Se requeriría una mayor investigación para evaluar el impacto que tienen las emisiones fugitivas de la transpiración de las plantas y para asegurar que no se permita el arroz contaminado para el consumo humano. Se debe poner mucha atención al ciclo total de vida y al destino de las plantas híper acumuladoras de mercurio, en caso de que se les cosechase, sin querer, como alimento o combustible, para evitar la ingesta o las liberaciones de mercurio por su combustión.

Además del arroz, se han evaluado los álamos de Norteamérica para conocer su capacidad para rehabilitar mercurio. Los álamos negros del este (*Populus deltoides*) crecen rápidamente bajo una variedad de condiciones, incluyendo su localización en las orillas ríos y llanuras aluviales (APGEN 2003).

Si podría aplicar la fito-rehabilitación a sitios con contaminación difusa con mercurio, como el río Nura y las tierras agrícolas circundantes en el valle de Nura, donde las inundaciones han causado una contaminación generalizada, la cual es difícil de manejar a través de medios convencionales. Plantar cultivos híper acumuladores de mercurio (plantas que pueden absorber y concentrar un contaminante en particular hasta cien o mil veces mayor que la concentración en el suelo) con el tiempo puede tener importantes beneficios para las rehabilitación a un costo relativamente bajo. Se debe considerar cuidadosamente la gestión de la cantidad cada vez mayor de biomasa que contiene mercurio.

6.3.3 La desorción térmica in situ

La desorción térmica in situ es una tecnología que se aplica a casos de contaminación grave del suelo con una mezcla de materiales orgánicos peligrosos (dioxinas, hidrocarburos aromáticos policíclicos, bifenilos policlorados), con una limitación geotécnica para excavaciones grandes y la necesidad de un tiempo muy corto de operación (Merly y Hube, 2014). Involucra la inyección de calor y la extracción de vapores del suelo y se le podría utilizar para sitios contaminados con mercurio o sitios con una combinación de mercurio/dioxina. Los experimentos han demostrado que a través de la desorción térmica in situ se llega a una eliminación de mercurio de las matrices del suelo de hasta un 99.8 por ciento (Merly y Hube, 2014). Esta tecnología, sin embargo, sigue en etapa de desarrollo.

Este proceso tiene un consumo extremadamente alto de energía y requiere de una red densa de perforaciones para poder extraer calor y vapores. Podría resultar difícil controlar las emisiones fugitivas de mercurio. Además, el gran número de perforaciones que se requiere provoca el riesgo de lixiviaciones de los contaminantes a cualquier sistema acuífero de agua fresca en el subsuelo; las perforaciones se deben monitorear de cerca para asegurar la integridad del sellado.



Imagen 12. Operación de la desorción térmica in situ en gran escala para abordar la contaminación de compuestos orgánicos en Estados Unidos. Fuente: Merly y Hube (2014)

6.4 LAS TECNOLOGÍAS COMPROBADAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS CON MERCURIO

6.4.1 Bombear y tratar

Este es el tratamiento que se aplica más comúnmente a las aguas del subsuelo contaminadas con mercurio. Tiene aplicaciones para el tratamiento del mercurio disuelto en salmuera, que es común en las celdas de mercurio empleadas en los sitios de plantas de cloro-álcali. El método involucra hacer perforaciones en la zona freática contaminada, bombear las aguas contaminadas a la superficie y tratarlas con una gama de medios de filtración. El objetivo del diseño es captar toda la pluma contaminada (o por lo menos su mayor parte) en un tiempo determinado (ya que los costos de mantenimiento continuo son elevados) y tratar el agua hasta que alcance un bajo nivel de contaminación con mercurio.

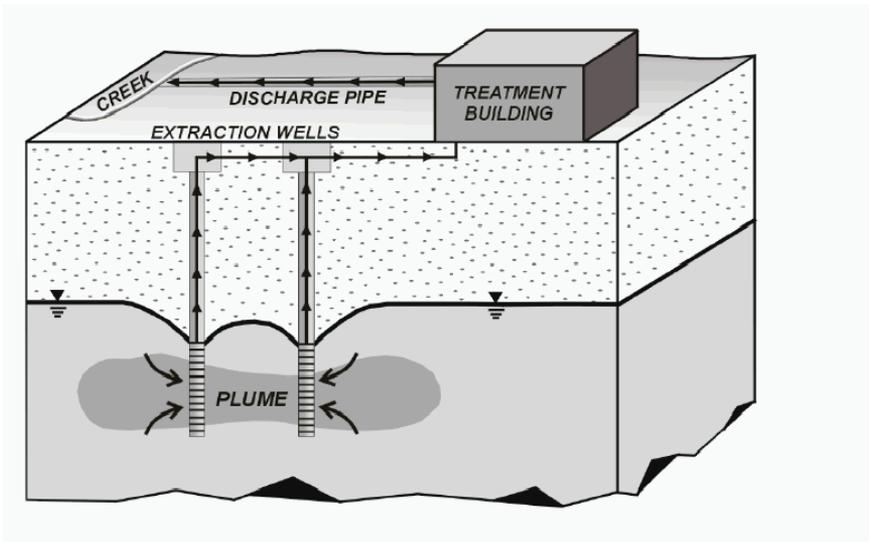


Imagen 13. Los principios de bombear y tratar.

Departamento de Geociencias de la Universidad A&M de Texas

La efectividad del sistema de bombear y tratar depende de la hidrogeología y del tipo de contaminantes, además de ser un proceso muy lento.

6.4.2 Las barreras reactivas permeables

La otra tecnología principal utilizada para el tratamiento de aguas contaminadas con mercurio son las barreras reactivas permeables (BRP). Las

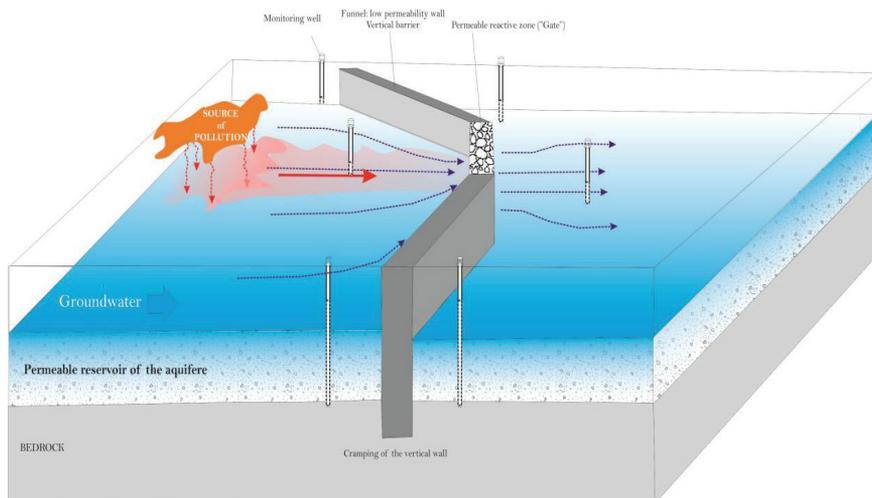


Imagen 14. Principio del ‘embudo y la puerta’ de las barreras reactivas permeables. Adaptado de Colombano et al, 2010.

tecnologías de las BRP proporcionan un tratamiento pasivo del agua del subsuelo en el sitio que se basa en la eliminación de mercurio de las aguas que fluyen por el subsuelo a través de un medio reactivo permeable in situ que involucra la absorción y/o la reducción química del mercurio. La pluma de mercurio es interceptada por un muro impermeable perpendicular al flujo de las aguas del subsuelo, diseñado para crear un embudo que la dirija hacia la zona permeable reactiva (o “puerta”), donde ocurre la eliminación del mercurio. Estas barreras laterales generalmente son muros pantalla de contención (Merly y Hube, 2014).

Esta tecnología se ha utilizado en muchos sitios en Europa, Australia y Estados Unidos para tratar una gama de contaminantes, como disolventes clorados, hidrocarburos, y compuestos inorgánicos. Se han incorporado materiales reactivos como cobre, pirita y carbón activado granular (CAG) como agentes de filtración y conversión en la sección de la ‘puerta’ reactiva de la barrera.

Una de las principales ventajas de este sistema es su costo más bajo comparado con los sistemas de bombear y tratar. Sin embargo, el uso del CAG para adsorber compuestos de mercurio requiere de un monitoreo y reemplazamiento regulares al saturarse, y debe de ser tratado como un desecho de mercurio, con los costos correspondientes que esto implica.

6.5 LAS TECNOLOGÍAS EMERGENTES PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA

Aunque se está desarrollado un número de tecnologías para el tratamiento del agua relacionadas con la tecnología del mercurio, la mayoría está en etapa de desarrollo experimental. Entre estas tecnologías están:

- la bio-rehabilitación;
- las nanotecnologías;
- los materiales alternativos de absorción;
- la coagulación y la floculación alternativas.

Están en una etapa temprana de desarrollo y no se desglosan en este documento. Sin embargo, se puede encontrar una discusión sobre sus méritos relativos en Dash y Das (2012) y en Merly y Hube (2014).

7. ESTUDIOS DE CASO EN SITIOS CONTAMINADOS CON MERCURIO - DIFUSOS Y PUNTUALES

Los siguientes estudios de caso documentan las dos formas distintas de sitios contaminados con mercurio que se discutieron en la sección 6.1 de estos lineamientos – la contaminación difusa y puntual. El primer sitio se localiza en la República de Kazajistán, un país que históricamente estuvo bajo control soviético, que sufriera los impactos de la contaminación de la industrialización bajo el régimen anterior, y el segundo sitio se localiza en la región Tamil Nadu de la India. El primer estudio de caso examina la contaminación extendida y difusa con mercurio a lo largo del río Nura y áreas adyacentes. El segundo estudio de caso se relaciona con una contaminación puntual con mercurio más específica en una ex-fábrica de termómetros en Kodaikanal. Se utilizaron diferentes enfoques para la caracterización y rehabilitación de cada sitio, los cuales ilustran las complejidades y los desafíos de la gestión de sitios contaminados con mercurio.

7.1 ESTUDIO DE CASO 1: CONTAMINACIÓN CON MERCURIO EN EL RÍO NURA Y SUS ALREDEDORES

El río Nura fluye desde la región montañosa del este de Kazajistán, hasta la región fuertemente industrializada de Karganda, internándose unos mil kilómetros hacia los lagos endorreicos de los humedales de Kurgaldzhino, de gran importancia internacional. Estos humedales fueron el primer sitio designado como sitio Ramsar en Kazajistán y se han registrado más de 300 especies migratorias de aves acuáticas en el Lago Tengiz, muchas de las cuales están en peligro de extinción. Durante décadas, una planta de producción de acetaldehído, conocida como ‘Karbid’, localizada en la ciudad de Temirtau, asentada sobre el río Nura, descargó grandes volúmenes de desecho de mercurio y otros contaminantes en el río antes de cerrar en 1997 (Ullrich et al., 2007, Sír 2015a).

En el río, el mercurio se asoció con millones de toneladas de cenizas volantes de la central eléctrica, formando un ‘limo tecnogénico’ contaminado que se dispersa sobre la llanura aluvial durante las inundaciones de la primavera (Heaven et al., 2000). En 2003, el Banco Mundial dio al gobierno de Kazajistán un préstamo por 40 millones de dólares para

realizar una rehabilitación a largo plazo de los impactos del mercurio. Los trabajos comenzaron en 2007 y concluyeron en 2013 (Sir, 2015a). Antes del programa de rehabilitación, las capas superficiales del suelo de la llanura aluvial contenían un estimado de 53 toneladas de mercurio, y los depósitos de limo a lo largo de las orillas del río contenían cerca de 65 toneladas, con 62 toneladas adicionales en la zona pantanosa de Zhaur, a aproximadamente 1.5 km de la ciudad de Temirtau.

Las condiciones hidrológicas estacionales en el río Nura controlan las concentraciones de mercurio en las aguas superficiales, y la mayor parte de la masa de mercurio fluye durante la inundación primaveral anual cuando los sedimentos contaminados del lecho se re-movilizan (Ullrich *et al.*, 2007). Los sedimentos dentro de una sección de 20 km río abajo de la confluencia del efluente estaban altamente contaminados. A 75 km río abajo de la ciudad de Temirtau, en el reservorio de Intumak, se encontraron concentraciones que excedían el valor límite permisible en Kazajistán, de 2.1 mg/kg y a 60 km río abajo se encontraron concentraciones de más de 10 mg/kg de mercurio en total (valor de intervención fijado en Holanda) (Heaven *et al.*, 2000).

Se encontró que la zona pantanosa de Zhaur, en las afueras de la ciudad de Temirtau y a menos de un kilómetro de los pueblos más cercanos, tenía concentraciones extremadamente altas de mercurio y había preocupación por la viabilidad a largo plazo de abastecimiento de agua potable para los habitantes. Se demostró que las concentraciones de mercurio acumuladas en el pescado seguían estando elevadas a más de 100 km río abajo de la fuente, y para la mayoría de las especies de peces, no había una reducción importante de los niveles de mercurio a esa distancia. Se ha sugerido que esto podría estar reflejando el transporte fluvial de metilmercurio desde sitios ubicados río arriba o bien un aumento de la producción de metilmercurio in situ río abajo (Ullrich *et al.*, 2007).

Un estudio sobre las concentraciones de mercurio en muestras de cabello humano realizado en 2009, incluyó el análisis de la ciudad de Temirtau y cuatro ciudades de la llanura aluvial (Chkalovo, Gagarinskoye, Samarkand y Rostovka) que se encuentran entre 1.5 y 35 km de la confluencia del efluente. A partir de este estudio, se determinó que el 17% de la población excedía el estándar de seguridad de 1 ug/g para la presencia de mercurio en el cabello desarrollado por la EPA de Estados Unidos, y se consideró que estas personas estaban en riesgo (Hsiao *et al.*, 2009).

Muchos de los habitantes de los dos centros poblacionales más grandes (Temirtau y Chkalovo), reportaron que estaban preocupados por la contaminación con mercurio y que no se comían el pescado de río que pescaban. Conversaciones con los proveedores de pescado del mercado indican que reconocen la sensibilidad del problema del mercurio en el pescado y a

menudo anuncian el origen del pescado que venden (Hsiao *et al.*, 2009). Aunque localmente puede haber habido conciencia sobre la contaminación con mercurio y posiblemente un menor consumo en los dos centros poblacionales más grandes, los tres pueblos ribereños consumen una cantidad significativamente mayor de pescado atrapado localmente que el comprado comercialmente, llegando a representar hasta un 80 por ciento del pescado que se consume. Junto con este estudio, se descubrió que cerca de un 84 por ciento de todas las muestras de pescado excedían el nivel de seguridad de Kazajistán de 0.3ug/g y un 33 por ciento excedía los niveles umbral de 0.5 ug/g (Hsiao *et al.*, 2009).

El resumen de los resultados e impactos de la contaminación con mercurio del río Nura, incluye:

- niveles inseguros de contaminación con mercurio en los sedimentos del río, los suelos de la llanura aluvial, y el pescado, con una pérdida de agua potable, pescado libre de contaminación y tierra agrícola limpia, lo que resultó en impactos económicos adversos relacionados con la contaminación;
- potenciales impactos en la salud de los adultos relacionados con el mercurio;
- potenciales impactos neurotóxicos en la salud de los niños y las correspondientes consecuencias educativas y económicas;
- potencial dispersión adicional de los sedimentos cargados de mercurio para acumularse en los humedales de Ramsar, donde termina el río, con riesgos para especies en peligro.

7.1.1 Las acciones de rehabilitación y sus resultados

Las actividades de rehabilitación realizadas entre 2007 y 2013 fueron conocidas como el “proyecto de descontaminación del río Nura”. Aunque se rehabilitaron cantidades importantes de contaminación con mercurio, sigue existiendo la preocupación sobre si se logró cumplir con las metas fundamentales del proyecto.

Los objetivos principales del proyecto eran descontaminar el lecho del río Nura, asegurando la gestión efectiva del relleno sanitario donde se contuvo el suelo contaminado, así como la rehabilitación de la represa de Intumak, que controla el flujo río abajo y funciona como trampa de los sedimentos contaminados con mercurio del reservorio (Sir, 2015a).

El dragado del lecho del río y la descontaminación de las orillas del río (para eliminar el limo tecnogénico contaminado con mercurio) han mejorado las condiciones ambientales del río Nura. En los inicios del proyecto, los niveles de contaminación con mercurio en los suelos y sedimentos iba

de 50 a 1500 mg/kg. En 2012, se eliminó el suelo contaminado con mercurio para cumplir con los niveles seguros aceptados internacionalmente para la capa superior del suelo de 2.1 mg/kg para el uso de suelo agrícola y 10 mg/kg para otros tipos de uso de suelo. Las áreas remotas se descontaminaron a 50 mg/kg (Sir, 2015a). Ha mejorado la calidad del agua del río y los niveles de mercurio están ahora por debajo de las guías para la calidad del agua potable. Ya se rehabilitó el sitio de la fábrica de Karbide, y se eliminaron 2 millones de toneladas de suelos contaminados en un relleno sanitario para desechos peligrosos que tiene capacidad para recibir más desechos en caso de necesitarse una actividad de rehabilitación adicional.

Se descontaminó un segmento de 30 km del río Nura, desde el reservorio de Samarkand hasta el pueblo de Rostovka, de contaminación con mercurio incluyendo el área afectada de la zona pantanosa de Zhaur. Esta acción de rehabilitación permitió que aproximadamente 6,234 hectáreas de tierra se volvieran disponibles para uso agrícola y ganadero, lo cual beneficiará a las comunidades ubicadas a lo largo del río Nura en un futuro previsible. La calidad del aire también ha mejorado considerablemente con la caída de los niveles de vapores de mercurio desde un rango de entre 6,000 y 140,000 ng/m³ hasta un nivel de 300 ng/m³, que se encuentra por debajo de límite reglamentario (Sir, 2015a).

En 2013-14, la Asociación Arnika de la República Checa realizó una encuesta por muestreo de validación parcial, para evaluar los impactos de la contaminación posteriores a la rehabilitación. Las pruebas de la ONG revelaron cantidades elevadas de determinados metales pesados (mercurio, cromo, plomo y cadmio) en algunas de las muestras de los sedimentos, niveles elevados de mercurio en las muestras de pescado, y niveles elevados de dibenzodioxinas policloradas y dibenzofuranos policlorados en algunas muestras de huevo. Esto indica que se requieren más acciones para asegurar que el río esté descontaminado a un nivel satisfactorio. El informe de Sir incluye una descripción completa del régimen de muestreo y una historia detallada del sitio de la contaminación con mercurio del río Nura (2015a).

Aunque la rehabilitación sí logró bajar la contaminación con mercurio en muchas partes del río Nura y sus alrededores, muchos sitios siguen contaminados y exceden los límites de rehabilitación establecidos para el proyecto de descontaminación. En Rostovka, Temirtau, incluyendo Krasniye Gorki, Chkalovo, Samarkand y Gagarynskoe, los niveles de mercurio siguen siendo muy elevados, al igual que los niveles de cobre, cromo y zinc (Sir, 2015a).

Los niveles de mercurio en el pescado del río siguen excediendo los lineamientos de consumo seguro y se deben emitir advertencias para proteger a las sub-poblaciones sensibles (mujeres embarazadas y niños). Debido

a los puntos críticos de contaminación detectados por la ONG Arnika, y a la contaminación indirecta continua del pescado, se recomienda que se realice una toma continua de muestras de suelo, agua y biota, para evaluar la necesidad de realizar más actividades de descontaminación.

7.2 ESTUDIO DE CASO 2: LA CONTAMINACIÓN CON MERCURIO EN KODAIKANAL, TAMIL NADU, INDIA

Kodaikanal es un poblado ubicado en una colina, con alrededor de 40,000 habitantes, que se encuentra al sur de la India en el estado de Tamil Nadu. El área es popular entre los turistas por sus lagos, cataratas, acantilados de granito y valles boscosos. A 2000 metros sobre el nivel del mar, tiene un clima mucho más fresco que la mayor parte de las áreas circundantes. El clima más fresco fue un factor importante para el establecimiento de la fábrica de termómetros de mercurio de Ponds India en 1983, que fue adquirida a través de la fusión con Hindustan Unilever Limited (HUL) en 1987 (Gobierno de la India, 2011).

La fábrica de termómetros funcionó de 1993 a 2001, cuando cerró debido a denuncias de que vendían desechos de vidrio contaminado con mercurio a recicladores locales en el pueblo de Kodaikanal. El patio de desperdicios con desechos contaminados con mercurio fue sometido a una investigación y los residuos con mercurio fueron retirados, además de que se realizó una rehabilitación parcial del suelo. Sin embargo, el sitio principal de la fábrica de termómetros, localizado en una cresta boscosa que ve hacia el pueblo, sigue contaminado con mercurio y es el tema de investigaciones subsiguientes y de propuestas de rehabilitación.

Se descubrió que las prácticas laborales en el sitio llevaron a un “punto crítico” de contaminación con mercurio del suelo del sitio y de un arroyo que pasa por la fábrica. Además, las emisiones fugitivas de mercurio durante el funcionamiento de la fábrica, causaron niveles elevados de concentraciones de mercurio en el suelo en todo el sitio, además de tener impactos fuera del sitio (URS Dames y Moore, 2001).

Investigaciones subsiguientes detectaron que el lago Kodai Lake, un importante atractivo turístico al norte del sitio, también se había contaminado como resultado de las emisiones de la fábrica de termómetros (Karnasagar et al., 2006). Se calculó que las aguas del lago Kodai contienen un total de mercurio (HgT) de 356-465 ng l⁻¹, y niveles de metilmercurio de 50 ng l⁻¹. Los sedimentos del lago Kodai tuvieron 276-350 mg/kg de HgT con aproximadamente 6 por ciento de metilmercurio. Las muestras de pescado del lago reportaron entre 120 y 290 microgramos/kg de HgT.

El muestreo de aire realizado fuera de los límites de la fábrica de termómetros reportó un aumento significativo de las concentraciones de

mercurio ambiental, con niveles que alcanzan los 1.32 microgramos/m³ (Balarama Krishna et al., 2003). En comparación, los niveles de mercurio aerotransportado en áreas consideradas no-contaminadas van de 0.5 a 10 ng m³ (Horvat et al., 2000).

En términos del contexto ocupacional, el Instituto Nacional para la Salud y Seguridad Ocupacional de Estados Unidos (NIOSH, por sus siglas en inglés) ha establecido un límite máximo permisible de concentración de mercurio en el aire de 0.05 mg/m³ (NIOSH, 1992). Otros estudios han concluido que los niveles de mercurio aerotransportado superiores a 0.01 mg/m³ se consideren inseguros para sub-grupos sensibles, como las mujeres embarazadas (Moienafshari et al., 1999).

También se ha identificado contaminación fuera de sitio en la vegetación, como los líquenes y el musgo, que se sabe que acumulan mercurio. Las concentraciones iban bajando según la distancia con respecto a la fábrica, con muestras que van de “alrededor de 0.2 mg/kg” a 20 km de la fábrica (Balarama Krishna et al., 2003) hasta 87 mg/kg de peso seco en el sitio mismo (URS Dames y Moore, 2002).

La contaminación del suelo en el sitio de la fábrica es significativa y ha sido causada tanto por la deposición atmosférica debido a las liberaciones fugitivas de mercurio, como por las prácticas laborales en el sitio, tales como la eliminación de los desechos. Una evaluación ambiental de URS Dames y Moore (2002) concluyó que hay cuatro puntos críticos principales en el sitio con concentraciones elevadas de mercurio en el suelo. Estos son:

- El punto crítico A – Concentraciones de mercurio de entre 10 y 30 mg/kg en 40 por ciento de un área de 1800 m² situada alrededor de la antigua panadería y las áreas de almacenamiento de desperdicios de vidrio.
- El punto crítico B – Un área de 3040 m² al sureste del punto crítico A y al sur de la Ruta Ponds con concentraciones de mercurio de entre 10 y 30 mg/kg en 60 por ciento del sitio y un exceso de 500 mg/kg en 25 m² de esta área.
- Los puntos críticos C1 y C2 – Al sur del edificio de la fábrica en la Ruta Ponds. Un área de 8590 m² de las cuales alrededor del 60 por ciento contienen concentraciones de mercurio de entre 10 y 30 mg/kg.

A otra área de contaminación más baja (entre 0.1 y 10mg/kg) se le denominó Área D y contiene alrededor de 75 kg de mercurio en total (URS Dames y Moore, 2002).

Sin embargo, estos resultados fueron refutados por ex-trabajadores, quienes sugieren que es probable que existan concentraciones más altas

de mercurio en el suelo. Aunque los trabajadores argumentaron que hay tiraderos de desechos de mercurio, no se les ha detectado debido a la metodología de muestreo de la consultoría contratada por HUL. Estos puntos de vista recibieron más apoyo cuando se detectó que el balance de masa de mercurio por fábrica generado por URS Dames y Moore había subestimado las emisiones y liberaciones de mercurio de las instalaciones durante su vida operativa. El balance inicial de masa de mercurio concluyó que se consideraban 559 kg de mercurio como pérdidas (al medio ambiente) no justificadas. Un subsiguiente informe de evaluación del sitio publicado por URS Dames y Moore en 2002 tomó en cuenta una importación de mercurio que no se había declarado anteriormente de 10,810 kg al sitio, planteado por ex-trabajadores. Los consultores (URS Dames y Moore 2002) revisaron el balance de la masa de mercurio en el sitio y concluyeron que las pérdidas no justificadas eran de 2031 kg, con pérdidas en el bosque Pamba Shola de 1350 kg.

Una investigación del Ministerio de Trabajo y Empleo (Gobierno de la India, 2011) encontró que la cantidad real de mercurio que se había liberado al ambiente era de 10,974 kg. Aunque continua el debate sobre la magnitud de las liberaciones de mercurio en el sitio, queda claro que ocurrió una sustancial contaminación con mercurio en el sitio y que ésta ha tenido impactos significativos fuera del sitio en los cuerpos acuáticos y los bosques con alto valor de conservación adyacentes a la fábrica. Un estudio del Instituto Nacional de Investigación en Ingeniería Ambiental de la India (NEERI, 2015) informó sobre impactos fuera del sitio. Se halló niveles elevados de mercurio en 60 por ciento de las muestras de sedimentos tomadas de los arroyos en la inmediaciones del sitio, informando sobre los siguientes resultados; LP1: 0.507 mg/kg, PS1: 0.353 mg/kg, LP5: 0.228 mg/kg.

Desde el cierre de la planta, se han realizado algunas actividades parciales de rehabilitación. En mayo de 2003, se enviaron 290 toneladas de materiales contaminados con mercurio (incluyendo lodos de la planta, vidrio y mercurio elemental) a Estados Unidos para su tratamiento y para recuperar el mercurio. Sin embargo, la mayor parte de la contaminación del suelo sigue in situ. Los dueños del lugar han propuesto tratar el resto del suelo contaminado con mercurio con tecnología de lavado del suelo y volatilización térmica.¹⁶ Al igual que las demás tecnologías térmicas para el tratamiento de los desechos de mercurio, se debe incorporar equipo diseñado específicamente para el mercurio y dedicado al control de la contaminación del aire para asegurar que no se liberen vapores de mercurio al medio ambiente circundante. Aun tomando estas precauciones,

16 Accesado en <https://www.unilever.com/sustainable-living/what-matters-to-you/kodaikanal-india.html>

las emisiones de mercurio provenientes del tratamiento térmico directo siguen siendo problemáticas.

Este sitio contaminado con mercurio también trae a colación cuestiones relacionadas con el contexto relativas a los criterios para la rehabilitación del suelo. Muchos sitios industriales contaminados se pueden descontaminar para cumplir con los requisitos nacionales sin entrar en controversias, ya que están ubicados en complejos industriales o zonas similares que no están adyacentes a zonas residenciales o a áreas ecológicamente sensibles. En el caso del sitio de Kodaikanal, hay receptores ecológicos altamente sensibles en las inmediaciones del sitio y esto podría tener un impacto sobre los criterios de rehabilitación final para el suelo y demás matrices. El sitio contaminado colinda con el ecosistema boscoso de Pamba Shola, que es un antiguo bosque y santuario natural protegido por el gobierno del Estado de Tamil Nadu, y contiene flora y fauna en peligro de extinción.

La naturaleza prístina de este ecosistema y los impactos fuera del sitio de la fábrica de termómetros podrían requerir parámetros de rehabilitación más sensibles que los propuestos actualmente. Inicialmente, Hindustan Lever Limited (una subsidiaria de Unilever) propuso rehabilitar el sitio siguiendo el nivel de intervención (residencial) de Holanda de 10 mg/kg (es decir, dejar mercurio en los suelos del sitio a una concentración máxima de 10 ppm). Sin embargo, después de las negociaciones con el Consejo de Control de la Contaminación de Tamil Nadu, los criterios de descontaminación se relajaron a 25 mg/kg. Actualmente, la India no cuenta con criterios aplicables al suelo referentes a la contaminación con mercurio, y, por lo tanto, cualquier límite propuesto debería tomar en cuenta las sensibilidades específicamente ligadas al sitio de Kodaikanal.

La corporación URS Dames y Moore calculó que un criterio de descontaminación de 10 mg/kg resultaría en la eliminación y el tratamiento de 4100 m³ del suelo y sedimentos contaminados del sitio. El criterio propuesto de 25 mg/kg llevaría a que se trataran cantidades sustancialmente menores de material y a costos de rehabilitación más bajos. El nivel de intervención de Holanda de 10 mg/kg no necesariamente refleja resultados de rehabilitación “sustentables” (un enfoque que prioriza la prevención, la equidad intergeneracional, y el principio de que quien contamina paga), sino más bien refleja un enfoque basado en la exposición derivada de una evaluación de riesgos. Por esta razón, en Holanda también establecen un “nivel meta” de 0.3 mg/kg (MHSPE, 1994). Se le considera un nivel sustentable con riesgos insignificantes para el ecosistema, lo que permite que el suelo recupere su funcionalidad por completo para permitir que ahí se dé la vida humana, de las plantas y los animales (incluyendo los microbios y la micro fauna del suelo).

Por lo menos un estudio (Tipping et al., 2010), ha determinado que el límite crítico para el mercurio en el suelo en términos de la salud de los organismos del mismo es tan bajo como 0.13 mg/kg. Llegar a concentraciones tan bajas de mercurio en el suelo por medio de la tecnología de rehabilitación actual sigue representado un desafío; sin embargo, algunas técnicas y tecnologías argumentan estar llegando a este nivel.

7.2.1 Potenciales acciones de rehabilitación

Tomando en cuenta los inmediaciones sensibles de la ex-fábrica de termómetros, se deben considerar los criterios de rehabilitación que incorporan objetivos de sustentabilidad para alcanzar una plena funcionalidad del suelo en el sitio y sus alrededores. En cualquier evaluación de exposición se debe ver la inmaculada naturaleza del bosque Pamba Shola como receptor, debido a la continua liberación de vapores de mercurio desde el sitio y sus correspondientes impactos fuera del sitio.

Los criterios de rehabilitación propuestos actualmente llevarán a emisiones continuas de vapores de mercurio desde el sitio y potenciales liberaciones a los ecosistemas acuáticos locales a través de la precipitación, el lixiviado y la movilización por medio de los sistemas de aguas superficiales. Ya se han demostrado el vínculo entre la fuente de contaminación e importantes receptores ecológicos, como el lago Kodai (Karunasagar et al., 2006).

En esta instancia, la fuente de la contaminación, el suelo del sitio de la fábrica, debería rehabilitarse hasta alcanzar los estándares más altos posi-



Imagen 15. Unidad de destilación al vacío calentada indirectamente.

Fuente: econ industries GmbH citado en UNEP/ISWA 2015

bles para evitar la continua liberación de mercurio en el medio ambiente local. Un enfoque potencialmente sustentable podría requerir algunas modificaciones a la propuesta y los criterios de rehabilitación existentes. Una combinación de lavado de suelo y una unidad de desorción térmica al vacío podría alcanzar niveles de rehabilitación más elevados para proteger a los receptores sensibles y evitar una mayor dispersión de la contaminación. El lavado del suelo puede ayudar a separar los materiales más gruesos del suelo a los cuales es menos probable que se adhiera el mercurio. El material grueso se puede someter a prueba y declarar limpio o si siguiera contaminado, se le puede triturar hasta convertirlo en material fino y ser enviado de nuevo al proceso. El material más fino, que contiene la mayor parte de la contaminación con mercurio, se puede entonces introducir a la unidad de destilación al vacío. Una versión francesa de esta tecnología logró tratar el suelo contaminado hasta llegar a un contenido total de mercurio de menos de 1 ppm (1 mg/kg) en el suelo, y tuvo un valor de lixiviado de <0.001 mg/l (UNEP/ISWA, 2015). En ese momento, se pudo regresar el suelo al sitio.

Es poco probable que la operación de lavado y volatilización térmica del suelo propuesta por HUL pueda lograr este nivel de rehabilitación del suelo. Además, si se utiliza una tecnología térmica directa puede que también se enfrenten problemas con la liberación de vapores de mercurio durante la operación. Sería preferible utilizar la unidad de desorción térmica al vacío con calentamiento indirecto descrita para el tratamiento final, mientras se conserva el paso del lavado del suelo. Si con esta técnica se pudieran alcanzar concentraciones de mercurio en el suelo con ppm bajas, se podría eliminar la fuente de la contaminación continua a las vías fluviales y al bosque de Pamba Shola. Debe continuar el monitoreo continuo de los receptores ambientales alrededor del sitio para asegurar que se hayan identificado y rehabilitado todos los puntos críticos.

8. LA GESTIÓN DE LA SEGURIDAD Y LA SALUD TANTO OCUPACIONAL COMO COMUNITARIA PARA SITIOS CONTAMINADOS

Crear capacidad social a través del libre flujo de la información es la base para asegurar que la gestión de la salud y seguridad ocupacionales se ligue con la salud y la seguridad de la comunidad que rodea a los sitios contaminados. Todos los informes de investigación de sitios, planes de salud y seguridad, registros de riesgo, planes de rehabilitación, y planes de transportación y tratamiento de desechos deben estar disponibles a todos las partes interesadas para su discusión y enmienda lo más pronto posible.

La rehabilitación de sitios contaminados puede involucrar un número de etapas:

- la investigación preliminar del sitio;
- la investigación detallada del sitio;
- la gestión del sitio;
- la rehabilitación, la validación y la gestión continua del sitio;
- el transporte y el tratamiento de los desechos.

A lo largo de todas las etapas del proceso, se deben abordar los temas de salud y seguridad, tanto ocupacional como comunitaria. También se debe reconocer que los trabajadores del sitio tendrán equipo especializado de protección y monitoreo que no está disponible para quienes están fuera de los límites del sitio, así como periodos de exposición más cortos (<8 horas al día) en el sitio. Se deben establecer niveles de alerta para las emisiones fugitivas para así proteger a los miembros del público del otro lado de la reja del sitio, que reflejen su falta de equipo de protección y sus prolongados periodos de exposición (hasta 24 horas al día).

Cualquier cálculo de las concentraciones aceptables de contaminación aérea y en sus periodos promedio, basado en los riesgos deberá reflejar esta diferencia y ser calibrado para los receptores sensibles entre la comunidad

(como los niños, las personas de la tercera edad, las mujeres embarazadas y los individuos inmunocomprometidos).

8.1. RESUMEN

Durante las investigaciones y la rehabilitación, los sitios contaminados pueden presentar riesgos de salud y seguridad para los trabajadores y los miembros de la comunidad, y aunque estos riesgos pueden variar entre los impactos en sitio y fuera de sitio, se les debería abordar dentro de un mismo marco para asegurar la transparencia y la rendición de cuentas.

En cualquier etapa de los trabajos en el sitio se pueden encontrar peligros, los cuales pueden incluir otros metales pesados además del mercurio, así como disolventes orgánicos volátiles, hidrocarburos, plaguicidas, productos químicos industriales, o incluso contaminantes orgánicos persistentes y materiales radioactivos. Estos contaminantes pueden estar en forma de sólido, líquido, vapor o polvo en el suelo, el aire o las aguas del subsuelo. Otros peligros potenciales incluyen incendios, explosiones, espacios confinados, líneas de gas y electricidad, maquinaria, el manejo manual de los contaminantes y riesgos de transporte.

En algunas zonas de conflicto, tanto del pasado como actuales, los sitios contaminados también se pueden ver impactados por armas explosivas enterradas (AEE). Se deben tomar precauciones especiales al investigar este tipo de sitios y se debe buscar asesoría del personal de la defensa con experiencia en inspección para neutralizar estos dispositivos lo más pronto posible. Una extensa investigación preliminar del sitio, incluyendo todos los usos anteriores del sitio ayudará a identificar la presencia de material radioactivo y AEEs, y la necesidad de una inspección más detallada en busca de estos materiales. En un número de casos, se han encontrado también AEEs en viejos tiraderos municipales donde las bases de la defensa en las inmediaciones históricamente han tirado municiones y armas explosivas sin estallar.

La gestión de sitios contaminados debe asegurar que todos los trabajadores y miembros de la comunidad potencialmente afectados no estén expuestos a los peligros. Aunque los empleadores tienen el ‘deber de proteger’ a sus trabajadores, la gestión total del sitio tiene una responsabilidad social hacia la comunidad más amplia. El trabajo en los sitios contaminados puede representar riesgos por las sustancias peligrosas en estado no controlado, con poca o nula información sobre su identidad y concentración. Se deben tomar precauciones y suponer que el sitio contiene riesgos importantes a la salud y seguridad de los trabajadores y la comunidad más amplia. Las áreas bajo sospecha de contaminación deben verse como peligrosas, a menos que se verifique con pruebas que no lo son.

8.2 LA OBLIGACIÓN DE PROTEGER Y LA RESPONSABILIDAD SOCIAL

La gestión de sitios contaminados debe asegurar que:

- haya total cumplimiento de las leyes de salud y seguridad relevantes, y que a los trabajadores y a los representantes de salud y seguridad del gobierno se les proporcione consultorías y cooperación;
- a los trabajadores de todo tipo se les proporcione un lugar de trabajo y un sistema de seguridad laboral que los proteja de los peligros;
- la comunidad esté informada de los peligros que emanan del sitio y esté protegida de ellos. Esto incluye polvos, vapores, flujos de agua y suelos contaminados.
- todos los trabajadores reciban información, adiestramiento, capacitación y supervisión específica al sitio para trabajar de forma segura sin estar expuestos a los peligros;
- se proporcione equipo y ropa de protección personal adecuada sin costo para los trabajadores cuando no se puedan reducir los peligros a un nivel aceptable;
- la planta en su conjunto se instale o erija de forma que se pueda usar con seguridad;
- todo el manejo, procesamiento, almacenamiento, transporte y eliminación de sustancias en el sitio se realice de forma que no exponga a los trabajadores o a otros miembros de la comunidad a peligros.
- todos los informes, planes de salud y seguridad, registros de riesgos (ver abajo), planes de rehabilitación y planes de transporte y tratamiento de desechos del sitio estén disponibles gratuitamente para todos los trabajadores e interesados.

8.3 LOS REGISTROS DE LOS RIESGOS

La gestión de los sitios contaminados debe asegurar que los trabajadores y la comunidad tengan acceso a un registro de riesgos actualizado regularmente que estipule cuales son los peligros identificados, la evaluación del riesgo de lesión o daño y las medidas adoptadas para eliminar o reducir los riesgos. Los trabajadores y la comunidad deben estar protegidos por medio de la mitigación del peligro.

La aplicación de una jerarquía de medidas de control que van desde las más eficientes hasta las menos eficientes incluiría:

1. **la eliminación** – retirar los peligros o prácticas laborales peligrosas;
2. **la sustitución** – reemplazar un peligro o práctica laboral peligrosa con una menos peligrosa;

3. **el aislamiento** – separar el peligro o práctica laboral peligrosa de las personas involucradas en el trabajo (sistemas de cercas, acceso remoto o barreras físicas);
4. **la instalación de controles** – modificaciones a las herramientas o equipo o protecciones de la maquinaria;
5. **el control administrativo** – prácticas laborales para reducir el riesgo, adiestramiento, capacitación y letrados de advertencia;
6. **equipo y ropa de protección personal (EPP)** – proporcionada cuando se han aplicado otras medidas de control y se necesita aumentar la protección;
7. **el monitoreo y la revisión continuos de las medidas de control** – para asegurar la continua efectividad y protegerse contra consecuencias no intencionadas.

La frecuencia del monitoreo y de la revisión se debe basar en el nivel de riesgo, el tipo de práctica laboral, la planta o maquinaria involucrada, así como factores ambientales.

8.4 LA INFORMACIÓN Y LA CAPACITACIÓN

La gestión de los sitios contaminados debe asegurar que:

- se le proporcione a todos los trabajadores y a la comunidad más amplia formación e información relativa a todos los peligros identificados bajo la forma de un registro de riesgos. Este deberá incluir información relacionada con los contaminantes conocidos o sospechados;
- se le proporcione a todos los trabajadores inducción, información, adiestramiento, capacitación y supervisión en procedimientos de seguridad;
- se proporcione capacitación específica a los trabajadores involucrados con sustancias peligrosas, referente a los efectos sobre la salud, medidas de control, respuestas de emergencia y el uso correcto del EPP, entre otros temas;
- se lleven registros de toda la inducción y capacitación relacionadas a el trabajo con sustancias peligrosas;
- se capacite a todos los trabajadores en procedimientos de evacuación de emergencia y que éstos procedimientos estén disponibles a las comunidades en riesgo para ayudar a desarrollar procedimientos de respuesta a emergencias en caso de que haya impactos fuera del sitio.

8.5 LA SUPERVISIÓN

A todos los trabajadores se les deberá proporcionar supervisión adecuada para asegurar que no estén expuestos a peligros y practiquen cuidados

razonables con respecto tanto a su salud y seguridad como a la de otros. Esto requiere que:

- los supervisores tengan las capacidades, los conocimientos y la autoridad para desempeñar estas funciones;
- la capacitación sea continua y haya una revisión regular de los procedimientos de seguridad;
- se use el equipo de protección personal y se mantenga en condiciones adecuadas de funcionamiento.

8.6. EL ALMACENAMIENTO GENERAL Y LOS CONTROLES DE TRANSPORTE PARA CONTAMINANTES

Los principios generales referentes al control del almacenamiento y del transporte consisten en:

- Limitar el acceso a personas autorizadas únicamente.
- Almacenar contaminantes en áreas seguras y ventiladas con letreros que indiquen los materiales, las concentraciones, los riesgos y los controles.
- Monitorear los niveles de contaminación atmosférica y de temperatura en las áreas de almacenamiento para asegurar que se mantengan dentro de los niveles adecuados.
- Elegir un contenedor adecuado para el almacenamiento, que sea resistente a la corrosión o a los disolventes, por ejemplo.
- Asegurarse de que todos los contenedores estén etiquetados correctamente y que las etiquetas permanezcan intactas.
- Asegurarse de que todas las sustancias desconocidas se etiqueten como **SUSTANCIAS DESCONOCIDAS – TRATAR CON EXTREMA PRECAUCIÓN**.
- Revisar la compatibilidad de las sustancias que se almacenan juntas y separarlas en caso de que así se requiera. Evitar los riesgos de contaminación cruzada y mezclada.
- Revisar todos los contenedores en busca de fugas o filtración.
- Asegurarse de que haya disponible equipo contra incendios y para emergencias .
- Asegurar un procedimiento de evacuación bien desarrollado con simulacros regulares para situaciones de emergencia.
- Cerciorarse de que se aseguren todos los contaminantes antes y durante el transporte.

- Asegurarse de que se descontamine la planta en su conjunto y todo el equipo antes de que se le retire del sitio.

Todas las sustancias químicas, suelos y líquidos contaminados deberán almacenarse y transportarse de acuerdo a las leyes pertinentes.

8.7 EL TRANSPORTE Y EL ALMACENAMIENTO A LARGO PLAZO DE MERCURIO ELEMENTAL DE SITIOS CONTAMINADOS

Algunos esfuerzos de rehabilitación de sitios contaminados pueden llevar a la recuperación de mercurio elemental libre, de zonas dentro del sitio o de operaciones de tratamiento y recuperación en el sitio. El transporte y envasado de mercurio elemental requiere de una cuidadosa planeación y empaçado con vehículos preparados adecuadamente. La prohibición de la exportación de mercurio de Estados Unidos llevó al desarrollo de estándares estrictos para el envasado, la documentación, el transporte, la aceptación y el almacenamiento de mercurio elemental en instalaciones construidas para ese propósito con el fin de retirar el mercurio permanentemente del mercado.

El Departamento de Energía de Estados Unidos desarrolló una guía comparativa (Departamento de Energía de Estados, Unidos 2009) sobre las medidas prácticas y administrativas requeridas para realizar estas actividades cuando se lidia con miles de toneladas de mercurio elemental destinado para el almacenamiento permanente. La guía detallada incluye lineamientos referentes a los procedimientos de envasado y carga,



Imagen 16. Ejemplos de contenedores para mercurio – cilindros individuales de tres litros de mercurio elemental cada uno, empaçados en cajones con un total de 49 cilindros. Fuente: Departamento de Energía de Estados Unidos 2009

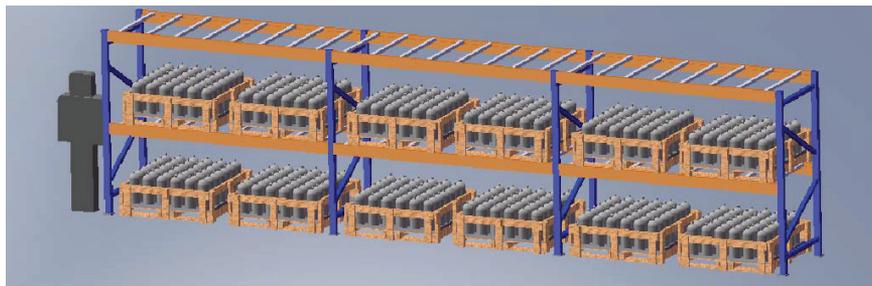


Imagen 17. Apilado de cajones con 49 cilindros de mercurio de 3 litros cada uno para almacenamiento permanente. Fuente: Departamento de Energía de Estados Unidos 2009

la descarga del vehículo y la interface en el centro de almacenamiento, la transferencia del mercurio de un contenedor a otro y el envasado final para el almacenamiento. También se desglosan los procedimientos de monitoreo ambiental a lo largo del proceso. En Estados Unidos, el envasado de cantidades más pequeñas de mercurio, por lo general, se hace en cilindros de metal sellados que contienen tres litros de mercurio.

Cuando se reúne una cantidad suficiente y se revisa su integridad estructural (incluyendo los sellos), se podrán combinar los cilindros en cajones con bandeja anti-derrame integrada que se pueden apilar.

Los apilados con capacidad antisísmica se localizan en un piso sellado e inclinado hacia el centro del cuarto (con un declive de tres grados), para permitir la fácil inspección visual y la contención de fugas. Los apilados también tienen dispositivos de supresión de fuego, y, por lo general, no exceden una altura de tres metros.

Dependiendo de la cantidad de mercurio elemental recuperada en un sitio contaminado, pudiera ser necesario utilizar un envasado de mayor volumen que los cilindros estándar de 2.5 o 3 litros. Para estos casos, se han desarrollado contenedores especiales de una tonelada métrica, para cumplir con los requisitos estrictos referentes al transporte y el almacenamiento a largo plazo.

Actualmente se está desarrollando una gama de lineamientos basados en los criterios de almacenamiento temporal y a largo plazo de mercurio elemental que se comercializa como producto (para usos permitidos) o que se haya retirado del mercado. Se puede encontrar información importante sobre este tema en las *Guías técnicas actualizadas para la gestión ambientalmente racional de residuos consistentes en mercurio elemental o compues-*

tos de mercurio que contengan o estén contaminados con mercurio (Rev 6) del Convenio de Basilea, así como en el recientemente publicado *Libro de consulta práctico sobre el almacenamiento y eliminación de desechos de mercurio* de la PNUMA/AIDS (UNEP/ISWA, por sus siglas en inglés)



Imagen 18. Ejemplo de cilindros de acero y una unidad de almacenamiento de acero de una tonelada métrica. Fuente: Bethlehem Apparatus Co. Hellertown, PA.

8.8 LOS SERVICIOS EN EL CENTRO DE TRABAJO E INSTALACIONES DE PRIMEROS AUXILIOS

Se deben establecer requerimientos específicos para los servicios importantes relevantes para el sitio contaminado como parte de la planeación específica de la salud y seguridad del sitio. Cuando sea pertinente, se deberán proporcionar instalaciones de descontaminación que deberán incluir, aunque no se limiten a:

- regaderas;
- instalaciones para el lavado de manos;
- instalaciones para el lavado de ojos;
- un área limpia independiente;
- áreas para la descontaminación de todo el equipo, incluyendo áreas de lavado de camiones. Si hay un nivel alto de contaminación, se debe proporcionar una unidad de descontaminación independiente para los trabajadores, además de los otros servicios sanitarios y de lavado y separada de los mismos.
- La intoxicación con mercurio requiere de la intervención médica especializada y de un tratamiento que incluye la quelación (un tra-

tamiento para acelerar la excreción del mercurio del cuerpo), además requiere que el trabajador sea retirado de la fuente de exposición hasta que se concluya el tratamiento, y se haya investigado y eliminado la fuente de exposición.

8.9 EL MONITOREO DE LA EXPOSICIÓN

El monitoreo de la exposición es un medio para medir la exposición a los contaminantes experimentada por las personas que trabajan en el sitio. En algunos casos también se podrá considerar adecuado para los miembros de la comunidad. El monitoreo de la exposición lo debe realizar una persona competente en el reconocimiento de los estándares de monitoreo. Todos los resultados del monitoreo de la exposición se deben poner a la disposición de cualquier persona que pueda haber estado expuesta a contaminantes peligrosos. En el caso de los sitios contaminados con mercurio, el monitoreo biológico por medio del muestreo de cabello de forma regular puede ser parte del programa de monitoreo de la exposición realizado por un laboratorio acreditado con procedimientos de aseguramiento y control de calidad, y experiencia en la interpretación de los resultados de los análisis.

8.10 LOS PROGRAMAS DE VIGILANCIA SANITARIA

Además de los requisitos para la gestión de sustancias peligrosas ya señalados, los trabajadores y los miembros de la comunidad que se tenga conocimiento de que hayan estado expuestos a sustancias peligrosas de ‘alta preocupación’ deberán formar parte de programas de vigilancia sanitaria. Estas sustancias peligrosas incluyen, más no se limitan a:

- asbesto;
- arsénico inorgánico;
- cromo inorgánico;
- mercurio inorgánico;
- cadmio
- plomo
- metilmercurio
- hidrocarburos aromáticos policíclicos;
- sílice cristalino;
- talio;
- plaguicidas de organofosfato; y
- Contaminantes Orgánicos Persistentes (COPs).

Los trabajadores locales de la salud pueden establecer un registro de salud bajo la supervisión de clínicos y toxicólogos con experiencia. Se pueden

incluir en el registro a los trabajadores y/o residentes bajo riesgo de exposición, y se puede ir monitoreando su condición médica a lo largo del tiempo. El beneficio de este enfoque es que los trabajadores locales de la salud se pueden capacitar para identificar síntomas centinela de exposición a contaminantes específicos e identificar las primeras etapas de los síntomas en pacientes que de otra manera pasarían inadvertidos. El registro también puede ayudar a identificar cualquier conglomerado de problemas de salud relacionados con la contaminación en una localidad que puede tener un legado de sitios que lleven a una exposición a largo plazo de los habitantes.

9. LOS SITIOS CONTAMINADOS Y LOS REQUISITOS DEL CONVENIO DE MINAMATA SOBRE EL MERCURIO: INVOLUCRAR A LAS PARTES INTERESADAS

El Convenio de Minamata sobre el Mercurio desglosa las actividades que las partes pueden realizar para abordar sitios contaminados y generar información para sensibilizar al público con respecto a las implicaciones de la contaminación para la salud humana y el medio ambiente. Guías, como este documento, pueden ayudar a fortalecer las capacidades dentro de la comunidad, entre las ONGs y los formuladores de políticas para abordar los sitios contaminados con mercurio dentro de su jurisdicción. También pueden identificar información valiosa para la industria sobre el sitio contaminado, aumentando así la efectividad de la evaluación del sitio y reduciendo los costos mientras se reduce potenciales conflictos sociales.

A estas alturas, las partes del Tratado del Mercurio todavía no han desarrollado una guía específica para los sitios contaminados, pero esto no impide que los gobiernos nacionales desarrollen sus propios marcos, políticas y leyes referentes a la gestión de los sitios contaminados, para así evaluar, identificar, caracterizar y rehabilitar los sitios contaminados. En la medida en que los países se muevan hacia la ratificación del Tratado del Mercurio, es importante estar conscientes de las declaraciones específicas formuladas en el tratado sobre los sitios contaminados con mercurio y la necesidad de involucrar al público.

Bajo el Artículo 12 “Sitios contaminados”, la Conferencia de las Partes debe preparar una guía para la gestión de sitios contaminados que incluya métodos y enfoques para “Involucrar al público” (PNUMA, 2013).

Además, bajo el Artículo 18, “Información, sensibilización y formación del público”, se requiere que cada parte le proporcione información al público sobre la contaminación con mercurio, así como los “resultados de sus actividades de investigación, desarrollo y monitoreo bajo el Artículo 19”.

Las partes, en colaboración con organismos intergubernamentales, ONGs y poblaciones vulnerables también deberán proporcionarle al público formación, capacitación y sensibilización con respecto a los efectos del mercurio sobre la salud.

El involucramiento público y el empoderamiento de la sociedad civil a través de la colaboración y la cooperación transversales requiere de un enfoque bidireccional entre el involucramiento de la sociedad civil a nivel nacional y regional, por un lado, y el involucramiento de las partes interesadas en el proceso específico del sitio. Cada uno de estos procesos debería tener la capacidad de informar y adaptar al otro. Sin embargo, para ser más efectivo, el involucramiento público necesita también tomar en cuenta el contexto cultural, social y político específico.

9.1 GUÍA PARA EL INVOLUCRAMIENTO DE LAS PARTES INTERESADAS EN EL SITIO ESPECÍFICO

El involucramiento de las partes interesadas en la identificación, evaluación y rehabilitación de sitios contaminados con mercurio involucra la participación deliberada de individuos, comunidades, ONGs, industrias, autoridades gubernamentales y otros que puedan tener un interés o verse potencialmente afectados por el sitio contaminado y las actividades de descontaminación. Las partes interesadas pueden incluir los propietarios del terreno y los residentes que habitan en las inmediaciones del sitio (o en el sitio mismo), las comunidades e industrias afectadas por los impactos continuos de la contaminación con mercurio, las autoridades ambientales, regulatorias, y sanitarias, las ONGs, y la administración y trabajadores del sitio.

En los casos en los que una industria tenga un sitio o sitios contaminados y desee involucrar a las partes interesadas en la rehabilitación, podría resultar benéfico involucrar a terceros (como consultores o académicos, por ejemplo), para conducir los procesos de involucramiento como ‘agente’ independiente. Esto podría resultar particularmente útil donde haya problemas de confianza o un conflicto histórico entre las partes interesadas. Algunas compañías podrán experimentar problemas cuando adquieren un sitio contaminado como parte de una fusión corporativa o de una transacción semejante y no sean responsables de haber creado la contaminación (aunque sí sean responsables de la implementación de la rehabilitación).

Se puede dar el caso de que un conflicto del pasado entre los contaminadores originales y las partes interesadas, como los residentes locales, hayan llevado a la rehabilitación del sitio a un impase. En estas situaciones, los nuevos propietarios del sitio pueden ‘restablecer’ la relación con las comunidades locales con un auténtico plan de involucramiento de las partes interesadas y beneficiarse de un diálogo respetuoso sobre el futuro

del sitio que mejor satisfaga las necesidades de todas las partes, y, a la vez, conduzca al restablecimiento del sitio a los estándares acordados.

Las industrias que posean sitios contaminados también podrían beneficiarse de la información que tengan las partes interesadas sobre el uso histórico del sitio, y la identificación de los potenciales puntos críticos donde se pueden haber tirado desechos. Podría incluir a los residentes locales, los conductores de camiones de carga, funcionarios de la comunidad, y demás personas con conocimiento a largo plazo del sitio y las prácticas laborales. Este tipo de información puede ser muy valiosa durante la evaluación preliminar del sitio y sus subsiguientes fases detalladas para reducir los costos a través de muestreos más precisos y eficientes. Por esta razón, cuando se está considerando la rehabilitación, se debe iniciar el involucramiento de las partes interesadas lo antes posible.

Las partes interesadas tienen el derecho a recibir información sobre los factores de la salud ambiental que afectan sus vidas, las vidas de sus hijos y familias, y el futuro de sus comunidades.

El objetivo del involucramiento de las partes interesadas es mejorar la calidad de las decisiones que se toman para el proyecto particular de rehabilitación, así como mejorar el proceso de toma de decisiones en sí mismo. El involucramiento bidireccional, que transmite información de manera efectiva y permite la participación de las partes interesadas en el proceso de toma de decisiones, puede implicar ahorros importantes y mejorar la credibilidad de las organizaciones involucradas en la gestión de los sitios contaminados. Las partes interesadas se benefician al contribuir a mejorar las decisiones referentes a la gestión de los riesgos y a opciones más aceptables para la gestión del sitio que proporcionen mejores beneficios para la salud, la seguridad y los servicios.

El involucramiento de las partes interesadas debe comenzar lo antes posible y continuar durante la identificación, la evaluación, la rehabilitación y la gestión del sitio contaminado. Además, se deben involucrar a las partes interesadas siempre que se identifique un problema nuevo que pueda representar un riesgo para la salud o el medio ambiente, o bien que pueda generar preocupación entre el público.

La preparación e investigación para el involucramiento de las partes interesadas se puede integrar en un proceso de identificación y caracterización del sitio, ya que cada proceso cuenta con un potencial considerable de información que puede informar a otro proceso. El plan de involucramiento de las partes interesadas deberá ser flexible y responder a las circunstancias cambiantes y a los insumos que proporcionan las partes interesadas.

9.2 LA IMPLEMENTACIÓN DEL INVOLUCRAMIENTO DE LAS PARTES INTERESADAS

Se debe proporcionar un resumen conciso del plan de involucramiento de las partes interesadas acordado a todas las partes interesadas bajo la forma de una 'declaración de intención', que debería incluir lo siguiente:

- información sobre los antecedentes del sitio, una declaración sobre el proyecto, el propósito y los objetivos del proceso de involucramiento;
- una descripción de los principales problemas que probablemente se aborden y los potenciales usos futuros del terreno;
- una declaración sobre el tipo de involucramiento que se busca y las técnicas de involucramiento que se usarán;
- un compromiso sobre cómo se usará la información del proceso y cómo se retroalimentará a las partes interesadas con respecto a la manera en la que se utilizaron sus insumos para la toma de decisiones;
- una línea de tiempo para el programa de involucramiento que permita suficiente tiempo para que las partes involucradas discutan y se formen opiniones sobre las cuestiones involucradas;
- fuentes de información adicional, incluyendo detalles de contacto para el personal relevante y los representantes de las partes interesadas.

Se deberán diseñar técnicas para el involucramiento de las partes interesadas para el contexto local y considerar los factores culturales, sociales y estacionales que pueden influir en el involucramiento. Estas técnicas incluyen, por ejemplo:

- reuniones públicas;
- reuniones en el sitio;
- información impresa;
- talleres;
- reuniones de diseño.

Se deberá dar retroalimentación a las partes interesadas en cada etapa del proceso de involucramiento después de las reuniones clave y al concluir el programa. Se deberá incluir un resumen de los insumos proporcionados por las partes interesadas y cómo se consideraron e incorporaron en el proceso de toma de decisiones, así como la documentación de las características clave del proceso de involucramiento. La retroalimentación también deberá incluir otros factores fuera del proceso de involucramiento que puedan haber influido las decisiones tomadas.

9.3 EVALUACIÓN E INFORME SOBRE EL INVOLUCRAMIENTO DE LAS PARTES INTERESADAS

La evaluación de los procesos y los resultados es una parte integral del programa de involucramiento de las partes interesadas y puede ayudar a:

- identificar si las partes interesadas están satisfechas de que el proceso es justo y que cumple con sus expectativas;
- mejorar las actividades y programas futuros de involucramiento de las partes interesadas;
- establecer si se requieren actividades continuas de involucramiento;
- mejorar la eficiencia de los costos de los procesos futuros.

Todas las partes interesadas deberán involucrarse en la evaluación y retroalimentación sobre la efectividad del programa a lo largo de la implementación del plan de involucramiento de las partes interesadas, así como después de concluido el proceso. Esto permitirá contar con un enfoque adaptativo a la gestión de la contaminación y que se puedan realizar mejoras cuando se necesite. Se debe considerar si es mejor asignar las tareas de evaluación a una organización independiente para que haya un análisis más objetivo del éxito del programa.

10. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). *Toxicological Profile for Mercury*. Public Health Service, U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, GA. 1999.
- Anchor Environmental (2003) Effects of Resuspended Sediments Due to Dredging Operations. Literature Review of Effects of Resuspended Sediments due to Dredging Operations. Prepared for Los Angeles Contaminated Sediments Task Force Los Angeles, California.
- Applied PhytoGenetics (APGEN). 2003 Cited in US EPA (2007) Treatment Technologies for Mercury in Soil, Waste, and Water. Office of Superfund Remediation and Technology Innovation Washington, DC 20460.
- Australian Federal Government (2013) Platypus Remediation Project. Sydney Harbour Federation Trust. Community Newsletter edition 8.
- Balarama Krishna M.V., Karunasagar, D., Arunachalam, J., (2003) Study of Mercury Pollution near a Thermometer Factory using Lichens and Mosses. *Environmental Pollution* 124 (2003) 357-360.
- Barcelo, D. and Petrovic, M. (2006) Sustainable Management of Sediment Resources Vol 1: Sediment Quality and Impact Assessment of Pollutants. Elsevier, 29 Sep 2006.
- Basel Convention (2007). Updated general technical guidelines for the environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with persistent organic pollutants (POPs). <http://www.basel.int/pub/techguid/tg-POPs.pdf>.
- Basel Convention (2012). Technical guidelines for the environmentally sound management of wastes consisting of elemental mercury and wastes containing or contaminated with mercury. As adopted by the tenth meeting of the Conference of the Parties to the Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal (decision BC-10/7). Geneva, Secretariat of the Basel Convention: 67.
- Bellanger, M, et al, 2013, Economic benefits of methylmercury exposure control in Europe: Monetary value of neurotoxicity prevention. Available from, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3599906/>
- BiPro (2010) Requirements for facilities and acceptance criteria for the disposal of metallic mercury. 07.0307/2009/530302. Final report 16 April 2010. For the European Commission, Brussels. Beratungsgesellschaft für integrierte Problemlösungen.
- Bozek, F., et al. (2010). "Implementation of best available techniques in the sanitation of relict burdens." *Clean Technologies and Environmental Policy* 12(1): 9-18.
- Colombano, S., Saada, A., Guerin, V., Bataillard, P., Bellenfant, G., Beranger, S., Hube, D, Blanc, C., Zornig et al. Girardeau, C., (2010) Which techniques for which treatments – A cost-benefit analysis. BGRM
- Dash, H., and Das, S., (2012) Bioremediation of mercury and the importance of bacterial mer genes. *International Biodeterioration & Biodegradation* 75 (2012) 207-213.
- Dyusembayeva, N. K. (2014). Экология Балхаша и генетическое здоровье населения (Environment Quality and Genetic Health of Inhabitants in Balkhash City). Toxics Free Kazakhstan: International conference, August - 7, 2014. Astana.
- Environment Agency UK. (2009) Soil Guideline Values for mercury in soil Science Report SC050021 / Mercury SGV. Technical note. Environment Agency, Rio House, Almondsbury, Bristol BS32 4UD.
- Environment Agency UK (2012) Treating waste by thermal desorption – How to comply with your environmental permit Additional guidance for: Treating waste by thermal desorption (An addendum to S5.06) 382_12 – Guidance. Bristol, United Kingdom.

- Environmental Health Committee (enHealth) 2012, The role of toxicity testing in identifying toxic substances: A framework for identification of suspected toxic compounds in water, Department of Health and Ageing, Canberra.
- Environmental Protection Authority of Tasmania - Contaminated Site Assessment (2005) as outlined in the *National Environment Protection (Assessment of Site Contamination) Measure 1999*. <http://epa.tas.gov.au/regulation/contaminated-site-assessment>.
- Eurochlor (2009). Management of mercury contaminated sites, *Env. Prot. 15*, 2nd Edition, November 2009, Eurochlor publication .
- European Commission (2011). Commission Regulation (EU) No 1259/2011 of 2 December 2011 amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels for dioxins, dioxin-like PCBs and non dioxin-like PCBs in foodstuffs (Text with EEA relevance). European Commission. Official Journal of the European Union. EC 1881/2006: 18-23.
- Garcia-Rubio A., J.M. Rodriguez-Maroto, C. Gomez-Lahoz (2011) Electrokinetic remediation: The use of mercury speciation for feasibility studies applied to a contaminated soil from Almaden. *ELECTROCHIMICA ACTA*, Volume: 56, Issue: 25 , Pages: 9303-9310
- Government of India (2011) Report of the Technical Committee Constituted by the Ministry of Labour and Employment, Government of India in connection with the Writ Petition No.8291 of 2006 in the Hon'ble High Court of Madras. Ponds Hindustan Unilever ex-mercury Employees Vs M/S Hindustan Unilever Ltd & 6 Others.
- Grandjean, P., et al (1999) Methylmercury Exposure Biomarkers as Indicators of Neurotoxicity in Children Aged 7 Years. *American Journal of Epidemiology*, 1999;149:301-5.
- Heaven, S., Ilyushchenko, M. A., Kamberov, I. M., Politikov, M. I., Tanton, T. W., Ullrich, S. M. and Yanin, E. P. (2000) Mercury in the River Nura and its floodplain, Central Kazakhstan: II. Floodplain soils and riverbank silt deposits. *Science of The Total Environment*, Vol 260, Issue: 1-3 p45-55
- Hinton J., M. Veiga M. (2001). "Mercury Contaminated Sites: A Review of Remedial Solutions", NIMD National Institute for Minamata Disease), Forum 2001. March 19 20, 2001, Minamata, Japan.
- Hooper, M. (2008) Soil Toxicity and Bioassessment Test Methods for Ecological Risk Assessment: Toxicity Test Methods for Soil Microorganisms, Terrestrial Plants, Terrestrial Invertebrates and Terrestrial Vertebrates. Prepared for the Office of Environmental Health Hazard Assessment California Environmental Protection Agency
- Horvat, M., Jeran, Z., Jacimovic, R., Miklavcic, V., (2000) Mercury and other elements in lichen near the INA Naftaplin gas treatment plant, Molve, Croatia. *Journal of Environmental Monitoring*, 2, 139-144.
- Hsiao, H, Ullrich, S, Tanton, T, (2009), "Burdens of mercury in residents of Temirtau, Kazakhstan I: Hair mercury concentrations and factors of elevated hair mercury levels", *Science of the Total Environment*, Vol 409, Iss 11, 2011 pp 2272-2280. Available from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969709012753>

- IPEN (2014) An NGO Introduction to Mercury Pollution and the Minamata Convention on Mercury. May 2014
<http://ipen.org/documents/ngo-introduction-mercury-pollution-and-minamata-convention-mercury>
- Kajenthira, A, Holmes, J, McDonnell, R, (2012) "The role of qualitative risk assessment in environmental management: A Kazakhstani case study", *Science of the Total Environment*, Vol 420, pp 24-32. Available from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969711015294>
- Kania, J & Kramer, M, 2011, Non Profit Management: Collective Impact, *Stanford Social Innovation Review*, Winter 2011. Available from http://www.ssireview.org/articles/entry/collective_impact
- Kania, J & Kramer, M, (2013), "Embracing Emergence: How Collective Impact Addresses Complexity", *Stanford Social Innovation Review*, Jan 2013. Available from, http://www.ssireview.org/blog/entry/embracing_emergence_how_collective_impact_addresses_complexity
- Karunasagar, D., Balarama Krishna M.V., Anjaneyulu, Y., Arunachalam, J., (2006), Department of Atomic Energy (DAE). Studies of mercury pollution in a lake due to a thermometer factory situated in a tourist resort: Kodaikkandal, India. *Environmental Pollution*, 143 (2006) 153-158.
- Li, P., Feng, X., Chan, H.M., Zhang, X., Du, B. (2015) Human Body Burden and Dietary Methylmercury Intake: The Relationship in a Rice-Consuming Population. *Environ Sci Technol*. 2015 Aug 18;49(16):9682-9. doi: 10.1021/acs.est.5b00195. Epub 2015 Jul 27.
- López, F.A., López-Delgado, A., Padilla, I., Tayigi, H. and Alguacil, F.J. (2010): Formation of metacinnabar by milling of liquid mercury and elemental sulfur for long term mercury storage, *Science of the Total Environment*, 408 (20), 4341-4345.
- López-Delgado, A., López, F.A., Alguacil, F.J., Padilla, I. and Guerrero, A. (2012): A microencapsulation process of liquid mercury by sulfur polymer stabilization/solidification technology. Part I: Characterization of materials. *Revista de Metalurgia*, 48(1), 45-57.
- Marsh et al., 1995b; Boishio and Henshel, 2000, cited in Hsiao, H, Ullrich, S, Tanton, T, 2009, "Burdens of mercury in residents of Temirtau, Kazakhstan I: Hair mercury concentrations and factors of elevated hair mercury levels", *Science of the Total Environment*, Vol 409, Iss 11, 2011 pp 2272-2280. Available from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969709012753>
- Meagher, R., and Heaton. A.C.P., (2005) Strategies for the engineered phytoremediation of toxic element pollution: mercury and arsenic. *Journal of Independent Microbiology and Biotechnology*. (2005) 32:502-513.
- Merly, C., and Hube, D., (2014) Remediation of Mercury Contaminated Sites. Snowman Network: Knowledge for sustainable soils. Project No. SN-03/08. February 2014.
- MHSPE, Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (1994) Intervention values and target values soil quality standards. Directorate-General for Environmental Protection, Department of Soil Protection, The Hague, The Netherlands.
- Moienafshari, R., Bar-Oz, B., Koran, G., (1999) Occupational exposure to mercury. What is a safe level? *Can Fam Physician*. 1999 Jan; 45: 43-45.
- National Environmental Engineering Research Institute (NEERI) (2015) Interim report - Assessment of mercury levels in soil, sediment, and water samples from the offsite area of Hindustan Unilever Limited factory (HUL), Kodaikanal, Tamilnadu- INDIA 26th October 2015.
- National Environmental Protection Council (NEPC) of Australia (1999) NEPM Schedule B (1) - Guideline on Investigation Levels for Soil and Groundwater. <http://www.esdat.com.au/Environmental%20Standards/Australia/NEPM%20Tables.pdf>
- NIOSH (1992) NIOSH recommendations for occupational safety and health: compendium of policy documents and statements. National Institute for Occupational Safety and Health. Department of Health and Human Services. Publication No. 92-100. Cincinnati, Ohio.

- Ohlsson, Y., Back, P. and Vestin, J. (2014) Risk Assessment of Mercury Contaminated Sites. SNOWMAN NETWORK - Knowledge for sustainable soils Project No. SN-03/08
- Petrlík, J. (2014). POPs and heavy metals pollution in Ekibastuz and Balkhash. Presentation for the conference held within the project "Empowering the civil society in Kazakhstan through improvement of chemical safety" on 7th August 2014 in Astana, Kazakhstan.
- Randall, P, Ilyushchenko, M, Lapshin, E, Kuzmenko, L, 2007, "Case Study: Mercury Pollution near a Chemical Plant in Northern Kazakhstan." Available from: <http://pubs.awma.org/gsearch/em/2006/2/randall.pdf>
- Robles I, M. G. Garcia; S. Solis (2012). Electroremediation of Mercury Polluted Soil Facilitated by Complexing Agents. *International Journal of Electrochemical Science*, Volume: 7 Issue: 3 Pages: 2276-2287.
- Rom, W.N. ed. (1992). *Environmental & Occupational Medicine*. 2nd ed. Boston: Little Brown and Company.
- Sir, M. (2015). Results of environmental sampling in Kazakhstan: heavy metals in sediments and soils (Final report). In: Toxic Hot Spots in Kazakhstan. Arnika - Toxics and Waste Programme, Prague - Karaganda, 2015. Available at: <http://english.arnika.org>
- Sir, M. (2015 a). Results of environmental sampling in Kazakhstan: mercury, methylmercury, PCBs and OCPs contamination of the River Nura (Final report). Contaminated sites and their management. Case studies: Kazakhstan and Armenia. J. Petrlík. Prague-Karaganda, Arnika - Toxics and Waste Programme.
- Stein ED, Cohen Y, Winer AM. (1996) Environmental distribution and transformation of mercury compounds. *Crit Rev Environ Sci Technol*. 1996; 26:1-43.
- Tipping, E, et al, Critical Limits for Hg (II) in soils, derived from chronic toxicity data, *Environmental Pollution* (2010), doi:10.1016/j.envpol.2010.03.027
- Ullrich, S, Ilyushchenko, M, Kamberov, I, Panichkin, V, Tanton, T, (2004), "Mercury pollution around a chlor-alkali plant in Pavlodar, Northern Kazakhstan", *Materials and Geoenvironment*, Vol 51, Iss 1, pp 298 - 301.
- Ullrich, SM, Ilyushchenko, MA, Uskov, GA, Tanton, TW, (2007), "Mercury distribution and transport in a contaminated river system in Kazakhstan and associated impacts on aquatic biota", *Applied Geochemistry*, Vol 22, Iss 12 pp. 2706-2734. Available from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292707002090>
- UNEP (2013) Minamata Convention on Mercury: Text and Annexures. Available from, http://www.mercuryconvention.org/Portals/11/documents/Booklets/Minamata%20Convention%20on%20Mercury_booklet_English.pdf
- UNEP/ISWA (2015) *Practical Sourcebook on Mercury Waste Storage and Disposal*.
- UNITAR (2014) <http://www.unitar.org/thematic-areas/advance-environmental-sustainability-and-green-development/mercury-0>
- United Nations (2015). United Nations *Enable* website provides generic information on the process of treaty adoption. <http://www.un.org/disabilities/default.asp?id=230>
- URS Dames and Moore (2001) Summary Report. Environmental Site Assessment and Preliminary Risk Assessment for Mercury. Kodaikanal Thermometer Factory, Tamil Nadu. Prepared for Hindustan Lever Limited (HLL), Mumbai. 24 May 2001.
- URS Dames and Moore (2002) Environmental Site Assessment for Mercury. Kodaikanal Thermometer Factory, Tamil Nadu. Prepared for Hindustan Lever Limited (HLL), Mumbai.
- US DoE (2009) U.S. Department of Energy. Interim Guidance on Packaging, Transportation, Receipt, Management, and Long-Term Storage of Elemental Mercury. November 13, 2009. Prepared by Oak Ridge National Laboratory.

- US EPA (1996) Mercury study report to Congress - Volume III: An assessment of exposure from anthropogenic mercury emissions in the United States - EPA-452/R- 96-001c, April 1996.
- US EPA (2001) Water quality for the protection of human health: methylmercury. EPA-823-R-01-001, US EPA, Office of Science and Technology, Office of Water, Washington, D.C. 20460.
- US EPA (2004) Mercury Response Guidebook (for Emergency Responders)
<http://www.epa.gov/mercury/spills/#guidebook>
- US EPA (2007) Treatment Technologies for Mercury in Soil, Waste and Water. Office of Superfund Remediation and Technology Innovation Washington, DC 20460.
- US EPA (2012) Phytotechnologies for site cleanup.
<http://www.clu-in.org/download/remed/phytotechnologies-factsheet.pdf>
- US EPA (2014, 29-12-2014). "Mercury - Basic information." Retrieved 05-04-2015, 2015, from <http://epa.gov/mercury/about.htm>.
- US Environmental Protection Agency, 2014, "Environmental Effects: Fate and Transport and Ecological Effects of Mercury", Available from <http://www.epa.gov/hg/eco.htm>
- US EPA Region 9 (2015) <http://www.epa.gov/region9/superfund/prg/>
- US Government (1998) Overview of Thermal Desorption Technology. An Investigation Conducted by Foster Wheeler Environmental Corporation and Battelle Corporation on behalf of the US government. Contract Report CR 98.008-ENV.
- Veiga, M.M. and Baker R.F. (2004), Global Mercury Project Protocols for Environmental and Health Assessment of Mercury Released by Artisanal and Small-Scale Gold Miners. Vienna, Austria: GEF/UNDP/UNIDO, 2004, 294p.
- Wang J., X. Feng, C. Anderson, W. N. Christopher (2012) Remediation of mercury contaminated sites - A review. *Journal of Hazardous Materials*, Volume: 221, 1-18.
- Watson, A., Petrlik, J. (2015). "Dangerous State of Play – Heavy Metal Contamination of Kazakhstan's Playgrounds." Public Interest Consultants and Arnika – Toxics and Waste Programme. In: Arnika, EcoMuseum, CINEST 2015: Toxic Hot Spots in Kazakhstan. Monitoring Report. Arnika – Toxics and Waste Programme, Karaganda – Prague, April 2015.
- Winder, C., and Stacey, N., (2004) Occupational Toxicology, Second Edition Chris Winder, Neill H. Stacey (ed) CRC Press; 2 edition (February 25, 2004).
- WHO, 1990; Castoldi, 2001 cited in Hsiao, H, Ullrich, S, Tanton, T, 2009, "Burdens of mercury in residents of Temirtau, Kazakhstan I: Hair mercury concentrations and factors of elevated hair mercury levels", *Science of the Total Environment*, Vol 409, Iss 11, 2011, pp 2272-2280. Available from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969709012753>



un futuro sin tóxicos

www.ipen.org

ipen@ipen.org

[@ToxicsFree](https://www.instagram.com/ToxicsFree)