

# INVESTIGACIÓN DE REMEDIACIÓN

## Proyecto de Remediación del Mercurio Huancavelica, Perú



Preparado por  
*The Environmental Health Council*  
Bryn Thoms, RG, and Nicholas Robins, Ph.D

30 de julio, 2015

## **Tabla de contenidos**

<b>Resumen ejecutivo .....</b>	<b>6</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>8</b>
<b>Plan integrado .....</b>	<b>9</b>
<b>Objetivos .....</b>	<b>12</b>
<b>Cronología de los estudios .....</b>	<b>12</b>
<b>Descripción del sitio.....</b>	<b>13</b>
<b>Ubicación del sitio .....</b>	<b>13</b>
<b>Entorno físico .....</b>	<b>13</b>
<b>Historia.....</b>	<b>14</b>
<b>Demografía y nutrición.....</b>	<b>14</b>
<b>Clima .....</b>	<b>15</b>
<b>Geología .....</b>	<b>15</b>
<b>Caracterización del agua de superficie y el agua de lluvia.....</b>	<b>16</b>
<b>Hidrogeología .....</b>	<b>17</b>
<b>Construcción de una casa típica .....</b>	<b>17</b>
<b>Proceso de extracción del mercurio y funcionamiento de los hornos.....</b>	<b>19</b>
<b>Resultados de la Investigación.....</b>	<b>20</b>
<b>Naturaleza y extensión.....</b>	<b>20</b>
<b>Suelo.....</b>	<b>20</b>
<b>Polvo.....</b>	<b>22</b>
<b>Paredes de tierra apisonada y adobe.....</b>	<b>22</b>
<b>Pisos de tierra.....</b>	<b>23</b>
<b>Vapor (aire interior).....</b>	<b>22</b>
<b>Análisis de especiación .....</b>	<b>23</b>
<b>Análisis de la extracción por fluido gástrico simulado .....</b>	<b>24</b>
<b>Resultados de los sedimentos.....</b>	<b>24</b>
<b>Area de contaminación (alcance del impacto) .....</b>	<b>28</b>
<b>Evaluación de riesgos .....</b>	<b>29</b>
<b>Modelo Conceptual de Sitio .....</b>	<b>31</b>
<b>Fuentes .....</b>	<b>32</b>

Receptores.....	36
Resumen de Evaluación de Riesgos.....	38
Conclusiones y Recomendaciones .....	39
Referencias .....	42

### Abreviaciones

ADC (AOC)	Area de Contaminación ( <i>Area of Contamination</i> )
AN	Asociación Nuevavelica
As	Arsénico
ATL	Nivel aceptable en tejido ( <i>Acceptable Tissue Level</i> )
ATSDR	Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades ( <i>Agency for Toxic Substances and Disease Registry</i> )
(bgs)	por debajo de la superficie del suelo
CERCLA	Ley de Responsabilidad, Compensación y Recuperación Ambiental ( <i>Comprehensive Environmental Response Compensation and Liability Act</i> )
cm	centimeters
COC	Contaminantes preocupantes ( <i>Contaminants of concern</i> )
CTE	Estimación de la tendencia central ( <i>Central Tendency Estimate</i> )
CTUIR	Reserva de Tribus Confederadas de Indios de Umatilla ( <i>Confederated Tribes of the Umatilla Indian Reservation</i> )
DI	Desionizado
DRf	Dosis de referencia ( <i>Reference dose</i> )
EAA (AAS)	Espectroscopia de Absorción Atómica ( <i>Atomic Absorption Spectroscopy</i> )
EF (FS)	Estudio de factibilidad
CSA (EHC)	Consejo de Salud Ambiental ( <i>Environmental Health Council</i> )
EPA ORD	Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos Oficina de Investigación y Desarrollo ( <i>USEPA Office of Research and Development</i> )
ESS (SSE)	Extracción selectiva secuencial ( <i>Selective Sequential Extraction</i> )
FBA (BAF)	Factor de Bioaccesibilidad ( <i>Bioaccessibility factor</i> )
Ft	pie
GI	Método de extracción gastrointestinal <i>in vitro</i> ( <i>Gastrointestinal in vitro extraction method</i> )
GIS	Sistema de información geográfica ( <i>Geographic Information System</i> )
GPS	Sistema de Posicionamiento Global ( <i>Global Positioning System</i> )
HCl	Ácido hidroc্লórico

Hg	Mercurio y compuestos de mercurio
Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	Cloruro de mercurio
HgAu	Amalgama mercurio oro
HgCl <sub>2</sub>	Dicloruro de mercurio
Hg <sup>o</sup>	Mercurio elemental
HgO	Óxido de mercurio
HgS	Sulfuro de mercurio
HgSe	Mercurio seleniuro
HgSO <sub>4</sub>	Sulfato de mercurio
HNO <sub>3</sub>	Ácido nítrico
HOAc	Ácido acético
in	pulgadas
IR	Investigación Remedial
IRB	Institutional Review Board
IRIS	Sistema Integrado de Información sobre Riesgos ( <i>Integrated Risk Information System</i> )
km	Kilómetros
KOH	Hidróxido de potasio
LOF	Ubicación del sitio contaminado ( <i>Locality of Facility</i> )
m	metros
MCS (CSM)	Modelo Conceptual del Sitio ( <i>Conceptual Site Model</i> )
MeHg	Metilmercurio
mg/kg	miligramos por kilogramo
NHANES	Encuesta nacional de examen de la Salud y la Nutrición ( <i>National Health and Nutrition Examination Survey</i> )
NIOSH	Instituto Nacional para la Seguridad y la Salud Ocupacional ( <i>National Institute for Occupational Safety and Health</i> )
ODEQ	Departamento de Calidad Ambiental de Oregón ( <i>Oregon Department of Environmental Quality</i> )
OHA	Autoridad de Salud de Oregón ( <i>Oregon Health Authority</i> )
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONU	Organización de las Naciones Unidas
Pb	Plomo
RAGS	Orientaciones para la Evaluación de Riesgos ( <i>Risk Assessment Guidance for Superfund</i> ) - (USEPA)
RBC	Concentración en función del Riesgo ( <i>Risk-based Concentration</i> )
RBDM	Orientaciones para la Toma de Decisiones basadas en el Riesgo ( <i>Risk Based Decision Making Guidance</i> ) - (ODEQ)
RfC	Concentración de referencia ( <i>Reference concentration</i> )
RME	Exposición máxima razonable ( <i>Reasonable Maximum Exposure</i> )
RSL	Niveles de detección regionales ( <i>Regional Screening Level</i> )
snm	sobre el nivel del mar
TWA	Promedio ponderado en el tiempo ( <i>Time Weighted Average</i> )

USCS	Sistema unificado de clasificación del suelo <i>(Unified Soil Classification System)</i>
USEPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos <i>(United States Environmental Protection Agency)</i>
XRF	Fluorescencia de los Rayos X
□ g/m <sup>3</sup>	microgramos por metro cúbico

## **Resumen ejecutivo**

La contaminación por mercurio (Hg) causada históricamente por el tratamiento del mercurio en Huancavelica, Perú, y sus alrededores, se encuentra en las paredes, pisos y el aire interior en 75% de las casas de barro estudiadas, por encima de los niveles de detección basados en la salud. La población que corre el riesgo de estar expuestas al mercurio y de sufrir efectos negativos para su salud es alrededor de 19,000 de los aproximadamente 48,000 habitantes de la ciudad. A pesar de que se ha dejado de procesar mercurio desde los años 1970, Huancavelica sigue siendo una de las áreas urbanas más contaminadas por el mercurio en el mundo (Hagan, 2014). Se han realizado varias investigaciones, del 2009 al 2014, destinadas a caracterizar el alcance y magnitud de la contaminación por mercurio. Varios informes de investigación sobre proyectos específicos han publicado documentación validada por expertos, acerca del riesgo que corren los residentes de sufrir una significativa contaminación. El Consejo de Salud Ambiental - CSA (EHC<sup>1</sup>) ha hecho posible la presente Investigación de Remediación (IR) que estudia las características del sitio y la contaminación existente, resume las investigaciones realizadas, hace una evaluación basada en el riesgo y formula recomendaciones en apoyo a una acción de remediación.

Más de 400 años de procesamiento del mercurio en torno a la mina de mercurio de Santa Bárbara, situada varios kilómetros al sur de Huancavelica, han tenido por consecuencia la contaminación de las viviendas de adobe en Huancavelica y sus alrededores, como también de la superficie del suelo, de los sedimentos y de los productos alimenticios. Históricamente, las emisiones de gas resultantes de la quema del cinabrio en hornos de Huancavelica, diseminaron mercurio en la atmósfera, que al caer contaminó la superficie del suelo dentro del radio urbano. La mayoría de las casas en la ciudad están hechas de ladrillos de adobe contaminado y a menudo, las paredes internas y los pisos de esas casas no están sellados ni cubiertos. Por lo tanto, las paredes y los pisos de tierra están contaminados por una variedad de componentes de mercurio, algunos de los cuales son bio-accesibles. Además, el mercurio elemental depositado en las paredes y pisos puede ser liberado en ambientes interiores en forma de vapor, por lo que se encuentran elevados niveles de vapor de mercurio en el aire. También se ha utilizado los relaves en la construcción de caminos y los agregados contaminados extraídos del Río Ichu siguen siendo material habitual en los proyectos de construcción

La ciudad de Huancavelica está situada a alrededor de 12.000 pies sobre el nivel del mar y goza del clima moderado y seco de los Andes. Es la capital del departamento de mismo nombre, el más pobre del Perú. La mayoría de sus habitantes son quechua hablantes, y los que han tomado parte en esta investigación viven en un estado de pobreza extrema, generalmente con niveles de alimentación de subsistencia o casi subsistencia; en cada hogar suele haber varios niños. Son las mujeres las que manejan el hogar puesto que los hombres generalmente deben migrar para encontrar empleo. Alrededor de 50% de las casas en Huancavelica están hechas de ladrillos de adobes caseros o de tierra apisonada. Las viviendas usualmente son de un tamaño inferior a los 1.000 pies cuadrados, cuentan con pocas habitaciones, tienen techo de calamina, paredes y pisos

---

<sup>1</sup> EHC: *Environmental Health Council*

de barro y suelen estar en mal estado.

Para los seres humanos, existen dos vías principales de exposición al mercurio al interior de las viviendas: ingestión accidental de partículas de tierra e inhalación de aire contaminado. Los niveles de detección de riesgos para sitios específicos fueron desarrollados utilizando factores de exposición propios al lugar, referentes a la vía de ingestión, y se trabajó con las concentraciones de referencia establecidas (RfC<sup>2</sup>) para evaluar la vía de inhalación. El nivel de detección de sitios específicos para medir el mercurio total en paredes y suelos, en base al riesgo al que se exponen los niños y utilizando análisis de bio-accesibilidad específicos al lugar, fue determinado en 75 miligramos por kilo (mg/kg). El nivel de detección de RfC de la Organización Mundial de la Salud (OMS), de 0,2 microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{m}^3$ ), ha sido utilizado para el caso de inhalación de mercurio al interior de las casas.

Extrapolando a partir de los resultados del muestreo residencial en 60 casas de la ciudad, el mercurio en las paredes, los pisos y el aire de alrededor de 75% de las casas de adobe o tapial se encuentra por encima de los valores de detección de exposición específica. Puede ser que un 20% de las casas tengan por encima de  $1 \mu\text{m}^3$  de vapor de mercurio, nivel que exige una urgente acción de relocalización de los residentes, según opinan varios Programas de Remoción de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA<sup>3</sup>). Es extremadamente elevado el índice de mercurio que contienen los sedimentos contaminados del río Ichu, que son probablemente una fuente significativa de metil-mercurio en los peces locales, como también la fuente de contaminación de los materiales que utilizan agregados sacados del río. Fue limitada la evaluación de reservas de otros alimentos y una evaluación preliminar sugiere que los pescados locales del río Ichu, los pescados traídos de la costa desde Lima y la carne de alpaca, están contaminados en una proporción significativamente superior a los niveles de detección establecidos para la absorción en tejidos.

Sobre la base de los resultados de la investigación, la evaluación del riesgo en sitio específico y las conclusiones de la IR, el CSA (EHC) recomienda realizar varias acciones remediales. En primer término, se debería sanear o remplazar las casas que muestran niveles de mercurio superiores a los niveles de detección en sitios específicos. Para apoyar la remediación, el CSA propone llevar a cabo un proyecto piloto para evaluar si sería factible cubrir paredes y pisos para disminuir la exposición al mercurio por ingestión accidental tanto como para reducir el vapor de mercurio. También se recomienda una evaluación adicional de sedimentos, alimentos comunes y agua potable.

---

<sup>2</sup> RfC: *Reference concentrations*

<sup>3</sup> USEPA: *United States Environmental Protection Agency*

## **Introducción**

El CSA (EHC) ha preparado la siguiente Investigación Remedial (IR) a fin de sintetizar el trabajo de evaluación, ayudar en la identificación de medidas remediales efectivas y apoyar los esfuerzos para la descontaminación de Hg y otros metales pesados en la peruana ciudad altiplánica de Huancavelica. El CSA desarrolló un trabajo similar de evaluación en Potosí, Bolivia, debido a semejanzas históricas entre las dos ciudades, en lo referente a las emisiones de gas. Aunque las conclusiones de este informe pueden ser adaptadas para orientar la descontaminación en Potosí, el mismo en primera instancia se centró en la limpieza de Huancavelica.

Históricamente, la ciudad de Huancavelica fue víctima de la contaminación desde el inicio de los procesos de refinación de mercurio, es decir a partir de 1564 (Robins, 2011), proveniente de la cercana mina de mercurio de Santa Bárbara, la más extensa en su género en el hemisferio occidental. Una vez extraído de la mina, el cinabrio, en su mayor parte era transportado a lomo de llama hasta una de las fundiciones de la ciudad o de sus alrededores, a objeto de extraer el Hg elemental. Sin embargo, una pequeña cantidad de Hg también era destilada cerca del pozo principal de la mina. Durante el periodo colonial (1564-1820) se produjo en esa ciudad aproximadamente 68.000 toneladas métricas de Hg, que se transportaba a las minas de plata de la región andina, como es el caso de Oruro y Potosí, donde se lo utilizaba en la refinación de la plata a través de un proceso de amalgamación. Alrededor de 17.000 toneladas métricas de vapor de Hg fueron liberadas por las fundiciones entre 1564 y 1810 (Robins, et al., 2012).

Las muestras tomadas recientemente en toda la ciudad revelaron trazas de Hg en diferentes medios y diferentes especies, muy por encima de los niveles de fondo. Muchas de las casas en Huancavelica fueron construidas con adobes (tierra apisonada o ladrillos) contaminados con Hg y la mayor parte de ellas tienen también pisos de tierra y paredes sin revocar. El Hg elemental que se encuentra en el adobe y el material del suelo ha causado que el aire al interior de las casas muestre una elevada concentración de Hg, por encima de los estándares de salud para viviendas.

Un reciente trabajo de evaluación acaba de demostrar que los niveles de Hg en el suelo, el aire al interior de las viviendas, los sedimentos y algunas reservas de productos alimenticios están por encima de los niveles aplicables a la salud humana. Este documento tiene por objeto presentar un resumen de los datos recolectados hasta la fecha en la ciudad de Huancavelica y sus alrededores en diferentes medios, identificar las vías de exposición y los niveles de actuación aplicables, y dar apoyo al desarrollo de un estudio de factibilidad centrado en la evaluación de varias opciones de descontaminación.

Debido a que la concentración de Hg en el aire al interior de las viviendas está significativamente por encima de los niveles de acción para aire interior definidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA), en más del 50% de las casas estudiadas en Huancavelica, se hace necesaria una respuesta pronta y urgente. Sin embargo, no se han identificado remedios efectivos ni fuentes de financiamiento.

El presente documento pretende abarcar la totalidad de los aspectos del proyecto (medios, contaminantes, rutas de exposición y opciones remediales); no es su intención sin embargo descartar una remoción como medida provisional si es que se logra identificar una solución



efectiva y financiamiento. Además, la parte de la IR sobre evaluación de riesgos está centrada en el Hg. Un futuro trabajo de evaluación debería incluir más contaminantes peligrosos (COCs) tales como otros metales pesados, que comúnmente corresponden a áreas mineras.

El IR ha sido redactado siguiendo un proceso de limpieza común, conforme a la Ley de Responsabilidad, Compensación y Recuperación Ambiental (CERCLA<sup>4</sup>) de USEPA. Esto incluye una fase de Investigación Remedial que sintetiza el trabajo de evaluación realizado hasta la fecha, así como una Evaluación de Riesgos que contempla las diferentes rutas de exposición, las vías completas y un resumen del riesgo actual y futuro. Proporciona también las bases para llevar a cabo un estudio de factibilidad (EF). Este último enfoca variadas alternativas y las compara considerando factores estándar de equilibrio (efectividad, costo, confiabilidad a largo plazo, capacidad de protección y aplicabilidad) a fin de recomendar el remedio más apto y eficiente. En este informe, se presenta la propuesta de un estudio piloto que da las bases para el EF. Se necesita un trabajo suplementario para cumplir con los requerimientos de un EF meticuloso.

El autor principal tiene una experiencia de 22 años en la utilización de la estrategia de descontaminación que indica el documento del Estado de Oregón sobre Toma de Decisiones basada en los Riesgos (RBDM<sup>5</sup>). Una buena parte de la evaluación de riesgos presentada utiliza el procedimiento de Determinación de Riesgos de Oregón, que es más detallado, pero sin embargo, se sigue de manera general el procedimiento de CERCLA. Cuando los valores referenciales son diferentes de los valores de Oregón, se presentará la diferencia y se la explicará. Por lo general, cuando hay conflicto en la aplicación de valores, la tendencia para la limpieza ambiental es de usar los valores de detección más conservadores. Es importante considerar este punto, especialmente cuando hay escasa información sobre el escenario de exposición. Si se maneja un valor menos conservador, se explicará adecuadamente cual fue el razonamiento.

## **Plan integrado**

En 2011, el CSA preparó un plan integrado para orientar el trabajo de evaluación en Huancavelica. Se presenta a continuación un resumen del trabajo propuesto y de aquél que fue llevado a cabo. Todas las muestras aquí descritas tomadas durante los estudios fueron recolectadas siguiendo protocolos revisados y aprobados por la *Institutional Review Board* de la Universidad de Duke y por el Comité de Ética de la Universidad Nacional de Huancavelica.

### **Fase 1 – Difusión a la comunidad y Compromiso y Desarrollo Institucional de la Asociación Nuevavelica**

Esta fase se completó en su mayor parte en 2009 y 2010, con servicios de extensión a los residentes de Huancavelica afectados, paralelamente a la creación de la organización gemela del CSA en Huancavelica: la Asociación Nuevavelica (AN), que orienta las acciones de sensibilización y educación a nivel local, apoya las actividades de diagnóstico con los residentes afectados y coordina una red de instituciones y otras partes involucradas, como apoyo a su

---

<sup>4</sup> CERCLA: *Comprehensive Environmental Response Compensation and Liability Act*

<sup>5</sup> RBDM: *Risk-Based Decision-Making*

propia misión y la del CSA. Se continuarán las acciones de extensión a la sociedad y de coordinación con la difusión de este informe, así como con acciones de sensibilización general y de educación acerca de los riesgos del Hg y de lo que pueden hacer los habitantes hasta que se lleve a cabo la descontaminación.

## **Fase 2 – Muestreo medioambiental**

### ***2009 Muestras de tierra y análisis***

En 2009, se recogieron muestras de tierra de 15 sitios en Huancavelica para análisis de Hg total. Se recogieron muestras triples de la superficie del suelo, hasta 2,5 cm de profundidad como también a 7,5 cm en cada ubicación. Se hizo igualmente, en exteriores, un muestreo de los ladrillos de adobe y la tierra apisonada fabricados de manera casera. Los resultados evidenciaron la necesidad de una evaluación más extensa de los múltiples medios, la cual fue realizada en 2010. Específicamente, de los resultados de los análisis de las casas de adobe se desprende la necesidad de evaluar el aire al interior de las construcciones de adobe y tierra apisonada, debido a que el Hg de los adobes se volatiliza hacia el ambiente interior. El trabajo de campo de este estudio fue realizado por Robins, González Espinoza y Halabi, con el apoyo de Hsu Kim en lo referente a los análisis de mercurio total y especiado y de Richter para la caracterización de la tierra, habiendo sido publicados los resultados en *Science of the Total Environment* (2012).

### ***2010 Muestras de medios variados y análisis***

En 2010, se recolectaron al interior de 60 casas, muestras de polvo de la superficie del suelo, de las paredes de adobe y los pisos de tierra, a objeto de analizar su contenido en Hg. Las muestras fueron ubicadas en el mismo lugar dentro de las casas, para poder determinar la relación existente entre los diversos medios y entender mejor las fuentes primarias de Hg al interior de las casas. El trabajo de campo de este estudio fue conducido por Robins, González Espinoza y Halabi y Hagan, y los análisis de laboratorio para mercurio total estuvieron a cargo de Hsu Kim en lo referente a mercurio total; los resultados fueron presentados en diferentes revistas (ver la sección de Referencias bibliográficas).

### ***2012 Muestras de cabello y sus análisis y cuestionarios sobre exposición de las personas a la contaminación***

En 2012, los habitantes del sub grupo de las 60 casas de donde se sacaron muestras en 2010, como también otras personas, dieron muestras de su cabello y llenaron cuestionarios que tenían por objeto medir la carga corporal a través de las concentraciones en el cabello y evaluar, gracias a los cuestionarios, cuáles fueron los factores que influyeron en la exposición. El trabajo de campo de este estudio fue conducido por Robins, Ecos y González Espinoza y los análisis de las muestras de cabello por Hagan.

### ***2013 Muestras de sangre, orina, alimentos, sedimentos y aire, y su análisis***

En 2013, se recolectaron muestras de sangre y orina para analizar su contenido de Hg total, en un subgrupo de participantes provenientes de las 60 casas en las que se analizó en 2010 el aire interior y otros medios. Fuera de ello, 20 otras personas que vivían en casas de adobe/tierra

apisonada fueron incluidos en el estudio. Se procedió a analizar Hg total en alimentos comunes del mercado local, en sedimentos del río Ichu y en varias muestras de aire del ambiente exterior, seleccionadas al azar en Huancavelica. El trabajo de campo y los análisis de laboratorio de este estudio estuvieron bajo la dirección de Robins, Ecos, Thoms, y González Espinoza.

### ***2013 Análisis de especiación del mercurio en viviendas y bio-accesibilidad***

Las 60 muestras tomadas en paredes y pisos en 2010 fueron analizadas para identificar las especies de mercurio, utilizando un procedimiento de extracción selectiva secuencial y, para la bio-accesibilidad *in vitro*, se recurrió a una simulación de fluido gastrointestinal que imita la digestión humana de tierra contaminada con Hg. Se espera que la concentración de Hg en la muestra sea la cantidad de Hg que puede integrarse a la corriente sanguínea luego de la digestión de tierra. Los resultados de este estudio se integraron al riesgo global que se presenta en la sección de Evaluación de Riesgos. El componente de laboratorio de este estudio estuvo bajo la dirección de Hagan.

### **Fase 3 – Análisis de datos**

El análisis de datos fue completado en su mayor parte e incorporado a los estudios previos, publicaciones, fichas personalizadas para los participantes y el presente informe. Este informe incluye un limitado sistema de información geográfica (GIS) para evaluar los datos existentes sobre Hg. Más adelante el trabajo del GIS podrá ser necesario para presentar una adecuada información acerca del riesgo para las personas, realizar campañas de difusión para el financiamiento del proyecto y ayudar en el análisis y la remediación de viviendas específicas. En varias oportunidades durante 2012, 2014 y comienzos de 2015, se presentaron los resultados acerca del Hg a quienes participaron en el estudio, utilizando fichas informativas que identifican el resultado individual para la casa de una persona como para sus muestras biológicas (cabello, sangre, orina) y su relación con el resto de la comunidad así como con los niveles de referencia de los Estados Unidos e internacionales.

### **Fase 4 – Desarrollo del Plan/Investigación de remediación y conferencia de presentación**

La cuarta fase del proyecto consiste esencialmente en la Investigación remedial (IR) y su divulgación. Los estudios arriba presentados dan una caracterización de los sitios y una evaluación de riesgo suficientes para dar sustento a una IR completa, específica para Hg, la cual se incluye en este informe. El CSA continuará su búsqueda de medios de financiamiento para llevar a cabo estudios piloto que evalúen variadas alternativas remediales, para ser incorporadas en un EF centrado en la descontaminación de Hg. El propósito es encontrar la acción o las acciones más efectivas en cuanto a la relación costo/resultado, culturalmente apropiadas y seguras a fin de proteger a los habitantes de la exposición al Hg y otros metales pesados, provenientes de las antiguas actividades mineras. Es posible que existan varias acciones remediales y seguras, pero dependiendo de una casa en particular o de una situación específicas, una puede ser más apropiada que las otras. Se prevé en el calendario de 2015 la realización de un estudio piloto que evalúe las potenciales acciones remediales dirigidas a la vez al Hg total en partículas en paredes y suelos, y al vapor de Hg en viviendas contaminadas.

La extensión a la comunidad se realizará a través de visitas individuales de los miembros de AN a los habitantes, de conferencias que presenten ante cada comunidad los resultados de la IR, de la difusión permanente de las fichas informativas personalizadas y de una incesante difusión en procura de financiamiento. También se seguirá divulgando entre los habitantes las maneras de reducir la exposición al Hg. El compromiso con los residentes y los dirigentes de la comunidad se mantendrá a través del diseño e implementación de acciones remediales que den a los habitantes la seguridad de que sus aportes y retroalimentación son tomados en cuenta e integrados en el proceso.

## **Objetivos**

Los objetivos de este informe son:

- Preparar un amplio documento que integre los resultados de todos los estudios realizados hasta hoy acerca de la contaminación por mercurio y sintetizar los riesgos que existen en Huancavelica para la salud humana.
- Demostrar la necesidad de acciones de remediación, basadas en una evaluación detallada y específica de cada sitio.
- Identificar de manera preliminar las alternativas en cuanto a acciones remediales.
- Proporcionar un resumen y un plan de realización de un estudio piloto que respalde la elaboración de un EF y determine la solución más apropiada.
- Difundir entre los habitantes de Huancavelica permanente información acerca de los peligros de la exposición al Hg y mantener el compromiso con la comunidad.

## **Cronología de los estudios**

Los datos siguientes y estudios dan las bases para la IR y la Evaluación de riesgos:

- Abril, octubre y noviembre de 2011 – Hg total en suelos, trapos de limpieza, ladrillos de adobe y aire en espacios interiores
- Robins N. Mercurio, minas e imperio; Los costos humanos y ecológicos de la minería de la plata en los Andes; Indiana: Indiana University Press; 2011.
- Robins, N, N. Hagan, S. Halabi, H. Hsu-Kim, R. Dario Espinoza Gonzáles, D. Richter, and J. Vandenberg, Evaluación de la exposición a la contaminación histórica de mercurio al interior de las casas en Huancavelica, Perú; presentación oral en la Conferencia internacional sobre el mercurio como contaminante global, julio de 2011.
- Robins, Nicholas and Nicole Hagan, La producción de mercurio y su uso en la producción de plata en los Andes coloniales: emisiones e implicaciones sobre la salud; Environ Health Persp 2012; 120(5):627-631.
- Robins, N.A., N. Hagan, S. Halabi, H. Hsu-Kim, R.D. Espinoza Gonzales, M. Morris, G. Woodall, D. Richter, P. Heine, T. Zhang, A. Bacon, and J. Vandenberg.

“Estimaciones de las concentraciones históricas de mercurio en la atmósfera, provenientes de la refinación del mercurio y concentraciones de mercurio total actuales en el suelo en Huancavelica, Perú, Science of the Total Environment. Vol. 426, No. 11 (Junio, 2012):146-154. 2012. doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.03.082

- Hagan, N, N. Robins, H. Hsu-Kim, J. Vandenberg y D. Leith, Especiación y bioaccesibilidad del mercurio en ladrillos de adobe y polvo del suelo en Huancavelica, Perú. Presentación posterior ante la conferencia de la Sociedad de Toxicología y Química ambientales (SETAC), noviembre, 2012.
- Hagan N, Robins N, Espinoza Gonzales RD, Hsu-Kim H., “Especiación y bioaccesibilidad del mercurio en ladrillos de adobe y polvo del suelo en Huancavelica, Perú..” Environmental Geochemistry and Health Vol. 36, No. 4 (Agosto, 2014). DOI 10.1007/s10653-014-9644-1

## **Descripción del sitio**

### **Ubicación del sitio**

La ciudad de Huancavelica está situada en el Departamento de Huancavelica, Perú, en los Andes centrales, a una altura aproximada de 12.000 pies (3.676 metros) sobre el nivel del mar (msnm). Ubicada en el valle del río Ichu, cuenta con una población de alrededor de 48.000 habitantes, de los cuales unos 50% viven en casas de adobe o de tierra apisonada. Llamamos Sitio a la ciudad de Huancavelica, que comporta cinco barrios (Ascensión, Yananaco, Santa Ana, San Cristóbal y Santa Bárbara), donde se recolectaron las muestras. Varias áreas de la ciudad fueron contaminadas por Hg en diverso grado.

A objeto de facilitar la recolección, la revisión y el análisis de las muestras, se dividió el sitio en cinco barrios. Esta división ayuda también a apoyar y priorizar futuras acciones de descontaminación al comparar las estadísticas demográficas de barrios específicos con la contaminación que probablemente afecta las zonas de exposición. Un trabajo adicional de evaluación puede presentar otras áreas de la ciudad que requieren valoración y una posible acción de descontaminación. Sin embargo, basándose en los estudios históricos realizados como en el conjunto de datos muy difundidos de que se dispone sobre Hg total, queda bastante bien identificada la extensión de la contaminación, tal como se había supuesto.

### **Entorno físico**

Huancavelica está ubicada en los Andes centrales, en el sur del Perú, aproximadamente a 12 grados 47 minutos sur de latitud y 74 grados 58 minutos oeste de longitud. El paisaje circundante es montañoso, con elevaciones de un rango entre 2.000 pies snm en el valle hasta más o menos 14.000 pies snm en las montañas vecinas. A nivel regional, en el departamento de Huancavelica, existe mayor variación en las altitudes, situándose el pico más elevado a unos 17.400 pies snm y el valle más bajo a unos 10.000 pies snm en su límite oriental. La región se ubica al extremo norte del Altiplano, donde reina un clima semiárido, de gran altitud, en una

abrupta meseta de escasa irrigación. El departamento de Huancavelica está constituido en su mayor parte por la zona de transición entre el altiplano y la Cordillera de Chonta en dirección norte-sur, con una configuración geográfica similar a la del altiplano pero con menos mesetas. El área que rodea a Huancavelica se sitúa entre dos cadenas montañosas, más elevadas en la parte occidental y ligeramente más bajas al este. Esto limita el drenaje, pero se encuentran más ríos y corrientes de agua que en el altiplano típico.

Por causa del clima semiárido, la vegetación se limita a hierbas y arbustos, con algún que otro árbol en la región de los valles. La vegetación nativa predominante en esta área es el pasto (ichu), común a la ecoregión llana de la Puna. El departamento de Huancavelica se encuentra en la parte norte de la región de la puna, donde crece variedad de pastos y diversos arbustos que son utilizados en la agricultura y hasta cierto punto en la construcción.

La ciudad de Huancavelica se sitúa en el fondo del valle del río Ichu, que, nacido al oeste de la ciudad, la cruza fluyendo hacia el este y desemboca en la cuenca del Amazonas, luego de un recorrido caprichoso. El valle del río Ichu se inclina suavemente hacia el este, configuración que se refleja en el área urbanizada por lo general. Algunas casas se han construido en las laderas de los montes que rodean a Huancavelica, pero sin alejarse demasiado del fondo del valle, debido a que en terreno montañoso las pendientes se acentúan de manera impresionante. Además, en las montañas vecinas, las laderas (rango de pendiente) presentan pendientes desde moderadas hasta casi verticales, con estribos rocosos muy elevados respecto al fondo del valle.

## **Historia**

Antes de la conquista del Perú por los españoles, los mineros indígenas extraían el cinabrio del yacimiento de Chaclatacana, próximo a la colina de Santa Bárbara. Lo utilizaban inicialmente como pigmento para pintarse la cara, con fines rituales. En 1563, los colonizadores españoles se enteraron de la existencia de tales yacimientos y empezaron en 1564 a extraer el cinabrio y a refinar Hg. Se empleó un sistema mixto de trabajo remunerado y de aplicación de la mita, requiriendo contratar a trabajadores de las provincias involucradas por un plazo definido. Los hornos de refinación se encontraban dispersos alrededor de la ciudad; sin embargo el grupo más importante se instaló en el barrio ahora denominado San Cristóbal, que era el lugar donde vivían los trabajadores reclutados. A pesar de que la población de la ciudad nunca sobrepasó los 15.000 habitantes, ésta resultaba vital para la Corona española puesto que era prácticamente proveedora exclusiva de Hg para las minas de plata de la región andina, en vistas a su amalgamación para el proceso de refinación de la plata.

La producción de Hg declina de manera general en el transcurso del período colonial, como resultado de la disminución de la calidad del mineral y de los derrumbes que limitaban el acceso a varios sectores de las minas. Durante el siglo XIX, la producción fue escasa e irregular, como reflejo de la inestabilidad política en el Perú, la tecnología obsoleta, la falta de inversión de capitales y el aumento de producción en la mina de Nueva Almadén en California. En el siglo XX aumentó la producción, a pesar de que la refinación se realizaba en instalaciones cercanas al pozo de mina y no en la ciudad.

## **Demografía y nutrición**

Como resultado de la pobreza, muy extendida, y de la contaminación por Hg en toda la ciudad, la población de Huancavelica es muy vulnerable. Alrededor de 75% de la gente vive en casas de adobe y tierra apisonada, probablemente contaminadas. Es más, la mayoría de esas viviendas tienen pisos de tierra y paredes sin recubrir.

Huancavelica es la capital departamental más empobrecida de Perú, y las personas que participaron en este estudio se encuentran entre los habitantes menos privilegiados de la ciudad. La gran mayoría de sus casas no tienen alcantarillas. El régimen alimenticio de los habitantes refleja de igual manera su pobreza, y consiste a menudo en papas, otros tubérculos y vegetales. Muchos habitantes también crían pollos, patos y cuyes al interior de sus viviendas, lo que hace que esos animales están expuestos al Hg del suelo. Además, algunos habitantes tienen llamas o alpacas, que pastan en inmediaciones del área urbana y se exponen al Hg en el suelo y potencialmente en las hierbas y granos. También se consume pescado, frecuentemente truchas, que pueden provenir de lagunas de la meseta altiplánica, de la costa y del río Ichu, que está altamente contaminado.

## **Clima**

Esta región tiene un clima predominantemente semiárido de gran altitud, con un promedio anual de precipitaciones de alrededor de 80cm, yendo de 1cm (2.5 pulgadas) en junio a unos 14cm (35 pulgadas) en febrero (climate-data.org). Como suele suceder en muchos climas de tipo estepa, las precipitaciones suelen ser muy abundantes y, con las pendientes escarpadas de esta región, es común que haya movimientos de terreno. Son frecuentes las tormentas entre enero y abril, y también lo son los deslizamientos de tierra. Cuando las tormentas son fuertes, suelen provocar sedimentos aluviales en la desembocadura de las pequeñas quebradas que llegan al valle del río Ichu. Las inclinaciones menos escarpadas de estos sedimentos son utilizadas generalmente en agricultura pero a veces allí se construyen viviendas. La urbanización, consistente en edificaciones residenciales y comerciales, ocupa sobre todo el fondo del valle del río Ichu, en Huancavelica.

La temperatura anual tiene un promedio de 8° Celsius, en un abanico que va de 6° a 25° C. La temperatura diaria es de alrededor de 10° Celsius, siendo las temperaturas más frías en la madrugada y las más elevadas en plena tarde.

## **Geología**

Huancavelica y la mina de mercurio de Santa Bárbara están ubicadas en la parte final sur de un cinturón minero polimetálico en los Andes centrales, donde dominan minerales sulfurados ubicados allá a raíz de una alteración hidrotermal. La geología del lugar consiste en rocas sedimentarias del Mesozoico y volcánicas del Terciario, con un sistema de fallas que corre de norte a sur y determina los yacimientos.

La ubicación de los minerales metálicos tiende a seguir las líneas de fracturas y fallas que se produjeron en la era terciaria, durante episodios de erupciones volcánicas. El distrito de Huancavelica está considerado como el mayor depósito de Hg en el hemisferio occidental. La mineralización dentro del cinturón más amplio incluye metal base y metales no preciosos

(cinabrio, arsenopirita, galena, realgar, esfalerita y barita). Los metales pesados dominantes asociados con esos ores son Hg, arsénico (As) y plomo (Pb), con cantidades menores de cobre (Cu), níquel (Ni), cadmio (Cd), cromo (Cr). El cinturón corre a lo largo del borde este de los Andes, del norte de La Oroya hasta el sur de Huancavelica y ha sido – como lo siguen siendo algunas áreas – una región minera consolidada y activa. Sin embargo, la explotación del Hg se limita a la recolección a escala individual de Hg elemental para la amalgamación artesanal de oro (Wise y Feraud).

La ciudad está instalada en lo alto de la zona de mineralización, orientada de noroeste a sudeste, con alrededor de treinta y siete millas de largo y dos de ancho (Arana et al.). El noventa por ciento del Hg extraído en este distrito viene de la mina de mercurio de Santa Bárbara (USGS 975). El Hg nativo o elemental ha sido encontrado durante las excavaciones en los sedimentos aluviales sobre los que la ciudad se ha ido construyendo desde los años 1700 y no solamente en los sitios donde se ubican los hornos. Aun actualmente, las personas contratadas para trabajos de excavación, como sucede en las construcciones, reportan hallazgos de Hg nativo (Crosnier).

Los impactos regionales de la quema de cinabrio en Huancavelica y la mina de Santa Bárbara aproximadamente desde 1.600 a.C hasta 1975 han sido debidamente documentados en Cooke et al. (2009) y respaldados por la modelización atmosférica aplicada históricamente, presentada en Robins (2011). La datación de una muestra de sedimentos, determinada por pruebas de radiocarbono y plomo isotópico en un lago situado aproximadamente a 6 kilómetros al sudoeste de Huancavelica, conjuntamente con las concentraciones de Hg, mostró que durante el auge del periodo de procesamiento del Hg en la Colonia, el índice de sedimentación de Hg era casi 1000 veces mayor al índice de sedimentación pre-antropogénica. A esto se suma que en las muestras de sedimentos del periodo colonial de procesamiento del Hg, las especies de Hg que no son sulfuros (formas de mayor biodisponibilidad) predominan sobre las especies pre-antropogénicas. Esta conclusión se encuentra avalada por Robins (2011) con la modelización atmosférica de las concentraciones de Hg durante el periodo colonial, en ambientes exteriores de la zona urbanizada de Huancavelica. Estos dos estudios demuestran que existen elevadas concentraciones de las formas de mayor biodisponibilidad de Hg a la vez en la superficie del suelo en Huancavelica, donde las casas están hechas de adobe, y en los sedimentos de lagos y ríos, de donde provienen peces para el consumo humano.

## **Caracterización del agua de superficie y el agua de lluvia**

El caudal anual promedio del río Ichu es de unos 160 metros cúbicos o 5.700 pies cúbicos por segundo (Tamayo, 1904). Este río serpentea a través de Huancavelica como un río de madurez moderada. Se forman sedimentos en las áreas de baja energía en las curvas internas de los meandros y entre un rápido y otro. El sistema fluvial presenta rápidos moderados cerca de la ciudad y acarrea de manera predominante guijarros y partículas de menor tamaño. Las aguas de lluvia y aguas servidas de la ciudad desembocan en el río Ichu en diferentes lugares, ya que se carece de una estación de tratamiento de aguas. El sedimento de grano fino, que tiende a ser el más abundante entre las partículas de suelo erosionado y presentar la mayor concentración de Hg, se encontró en el río Ichu de Huancavelica durante la toma de muestras en 2013. El resultado del muestreo de sedimentos se detalla más adelante, en la sección de Resultados.



## **Hidrogeología**

Es probable que los aluviones del río Ichu estén empapados de aguas subterráneas, que son sin duda accesibles a escasa profundidad. Al alejarse de los límites externos del valle, el agua subterránea se ve encauzada por el caudal que fluye sobre la capa rocosa fracturada y a menudo sube a la superficie en manantiales. Éstos en algunos casos son de uso individual y proporcionan agua para uso doméstico, aunque la mayoría de las viviendas de la ciudad están conectadas a la red municipal de distribución de agua, que en gran parte proviene del río Ichu. Debido a que el Hg inorgánico se disuelve difícilmente en el agua, no es muy probable que la contaminación con Hg de las aguas subterráneas se eleve por encima del nivel aceptable y seguro para el consumo.

El arsénico (As) es un contaminante frecuente en las aguas subterráneas en zonas volcánicas y de alteración hidrotermal. Debido a que tienen similares propiedades de precipitación, As y Hg suelen presentarse juntos y en concentraciones altas en los yacimientos de cinabrio y en las zonas de alteración cerca de ellos. Se recolectaron muestras del sistema municipal de agua de Huancavelica para análisis de As y Pb. Se hará una revisión adicional de estos datos en un informe posterior. La caracterización de As y Pb en aguas subterráneas y suelo no fue evaluada por el CSA (EHC) y no se presenta en la sección de detección de riesgos más que como un dato preliminar. Se justifica un análisis adicional de metales pesados en aguas subterráneas y suelo.

## **Construcción de una casa típica**

Existen varios tipos de casas en Huancavelica, comunes a toda la región andina. Predominan las casas hechas de tierra apisonada (“tapial”), material que está disponible en el suelo cercano a la construcción. Las paredes se levantan en moldes de 3 pies de alto y 4 pies de ancho, con 2 pies entre cada uno, que se mantienen temporalmente en el lugar mientras el suelo se rellena y compacta. La altura de los moldes va en aumento a medida que se termina cada fila, colocando los moldes unos al lado de otros hasta que se complete toda la pared exterior. El material utilizado para los techos suele ser la calamina, sin aislamiento. Debido a que utilizar la tierra del suelo cercano es eficiente y de bajo costo y gracias al clima seco, las construcciones de barro son las más comunes, particularmente para las familias de menores ingresos, hacia las cuales están enfocados los estudios de este informe. Alrededor del 75% de las casas incluidas en la evaluación pertenecen al tipo de construcción de adobe o tierra apisonada. Generalmente, las casas tienen patios cerrados. Muchas tienen cocinas y retretes exteriores, separados de la estructura principal, y según este estudio, la gran mayoría tiene piso de tierra.

El restante 20% de las casas incluidas hasta el momento en el trabajo de evaluación, están hechas de ladrillos de adobe y mezcla de arcilla. La tierra del suelo de la vivienda se utiliza como material para hacer los ladrillos que se coloca en los moldes, mezclada con algas del Ichu usadas como aglutinante, y que se deja secar antes de formar la pared. La argamasa está hecha con arcilla que se encuentra en el mismo lugar de la vivienda (Comentario personal, Espinoza, 2014).

Fuera de diferencias mínimas en la compactación, no parecen variar mucho los dos tipos de pared en cuanto a porosidad. El ladrillo de adobe puede ser más compacto y menos poroso debido simplemente a la facilidad de formar ladrillos más pequeños, comparada con la tarea de

compactar mayores volúmenes de material en una sola capa, como es el caso en la construcción con tierra apisonada. La variabilidad en la porosidad, que puede afectar los índices de penetración de vapor, está más probablemente relacionada al tamaño de la gravilla y al contenido en arcilla de los suelos del sitio. Además, las cubiertas de pared, como estuco o pintura, pueden atenuar de manera significativa los índices de penetración de vapor de Hg, aunque la mayoría de las casas de adobe o tierra apisonada tienen paredes sin recubrir. La información disponible sobre porosidad y permeabilidad de las paredes es limitada. Se justifica una evaluación adicional de estos parámetros y deberían ser abordados en el Estudio de Factibilidad.

Casi todas las casas, según la evaluación, tienen pisos de tierra. La construcción de pisos es muy parecida a la de las paredes, ya que se recurre a materiales del lugar y se los apisona para obtener una superficie plana y suave, que requiere escaso mantenimiento, o ninguno. Se trata de una vía de riesgo muy importante para los infantes y niños pequeños, que pasan mucho tiempo en el suelo y muestran índices más elevados de ingestión.

La mayor parte de las viviendas que entraron en la evaluación tienen en promedio alrededor de 700 pies cuadrados, con una puerta y una o dos ventanas por habitación. Las ventanas tienen marcos metálicos, de un solo panel y sin tratamiento aislante. Hay poca información sobre los índices de intercambio de aire para estos tipos de casas, pero sobre la base del tipo de construcción y según si la penetración en las paredes es más o menos densa, las casas son probablemente permeables. Las viviendas por lo general no tienen calefacción, fuera de alguna estufa a kerosene. Las cocinas suelen funcionar con carbón o estiércol, y se sitúan en un lugar separado de la casa o adyacente a ella. Se construye el área de cocina también con tierra del suelo del lugar, según el método del tapial o el de ladrillos de adobe. Las encuestas de 2011 dan información acerca del uso de estufas/chimeneas a leña y de las maneras de cocinar. Se justifica una evaluación adicional acerca de los índices de vapor de Hg en función del aumento de temperatura del adobe o de la tierra apisonada, en la medida en que existe una relación a la vez con las fluctuaciones de la temperatura ambiente durante el día, como con el importante aumento de temperatura generado por las estufas y la cocina. Se debería intentar informar acerca de este tema en el Estudio de Factibilidad.

### **Proceso de extracción del mercurio y funcionamiento de los hornos**

Se piensa que el proceso de extraer de las rocas el Hg elemental constituye la fuente primaria de contaminación por mercurio en Huancavelica. El mineral, predominantemente el cinabrio (HgS) en su forma rocosa, es extraído del yacimiento utilizando métodos mecánicos como picotas manuales, dinamita o, si es viable del punto de vista económico (después de la revolución industrial), equipos pesados. El tamaño de las partículas de mineral sin procesar varían desde guijarros (6 pulgadas/ 15cm) a piezas de  $\frac{3}{4}$  de pulgada / 2 cm o más pequeñas. Para extraer térmicamente el Hg de manera eficiente, el mineral se reduce posteriormente para crear una gravilla consistente de  $\frac{3}{4}$  de pulgada (2cm) o más pequeña. Entonces el mineral triturado se calienta en un horno a 600° C o más, lo que rompe el enlace HgS y libera Hg en la corriente agotada. Esta corriente es enviada entonces, en forma de destilación, usando el aire para la condensación principal y a veces a través de canales de agua como última etapa de la destilación. Se desconoce si se usaron históricamente los sistemas de canales de agua en Huancavelica. El Hg líquido (elemental) se colecta entonces en la base del sistema de destilación

y, en Huancavelica, se lo ponía en vasijas de cerámica que eran embarcadas hacia fuera (Robins, 2011).

Luego de haber sido extraído el Hg, el mineral sobrante o los residuos (calcina), de color rosáceo o ligeramente más rojo que el mineral no quemado, se descartan y pueden ser usados como material de construcción. El proceso de calentamiento tiende a evitar la reducción de las propiedades geotécnicas de los relaves y de esta manera éstos pueden servir aún para la construcción de caminos o de cimientos. Existe poca información acerca del uso histórico de relaves en la construcción en Huancavelica, aunque en muchos otros sitios mineros en el mundo, se los utiliza como material de construcción.

El agua utilizada en el proceso de destilación o en la limpieza del equipo de destilación, generalmente en operaciones de molienda o de condensación, suele tener un alto grado de contaminación por Hg y otros metales pesados. Independientemente del uso del agua en el proceso, el drenaje procedente de las áreas de molienda como de los hornos se puede identificar por llevar sedimentos de grano fino y muy contaminados debido al flujo de aguas pluviales.

La eficiencia del proceso de extracción aumenta por lo general durante el período global de explotación y extracción. Es un punto importante a considerar debido a que los hornos más antiguos y los equipos de destilación van perdiendo eficiencia respecto a los nuevos, lo que provoca mayores emanaciones de gases y de polvo. Es probable sin embargo que el equipamiento que data de la época anterior a la revolución industrial, no se hubiera modificado mucho en ese aspecto. Esto cobra mucha importancia para las minas de Hg que operaban en los años 1900. La mayor parte de las operaciones de quema en Huancavelica se realizaron entre 1700 y 1800. Por modelación y por las estimaciones de otros sitios de refinación de Hg, de manera conservadora se deduce que la pérdida sufrida era de alrededor del 25% de la producción de Hg total, hacia la atmósfera (Robins, 2012).

El compuesto de Hg común asociado al proceso de extracción de Hg se presenta como sigue:

- Mineral no quemado -  $\text{HgS}$ ,  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ , y a veces  $\text{Hg}^0$  (elemental)
- Mineral quemado y recaída de emanaciones -  $\text{Hg}^0$ ,  $\text{HgCl}_2$ ,  $\text{HgO}$ , Hg+ácidos húmicos

Adicionalmente al compuesto de Hg, cabe señalar que los compuestos de arsénico (As) se relacionan comúnmente con los minerales de ganga en las zonas donde hay Hg. Los minerales de ganga son vistos por lo general como un tipo de mineral que ayuda a la identificación del yacimiento mineral y que no suele ser rescatado para la producción. Como queda señalado en la sección Geología, existe muy poca información sobre la contaminación de As en Huancavelica. Sin embargo, sobre la base de los datos que proporcionan muchas minas de Hg en el mundo, el nivel de concentración de As puede estar por encima de los niveles de detección de riesgo.

El arsénico, contrariamente al Hg, no se libera a altas temperaturas a partir de su compuesto sulfúrico, de tal manera que el As generalmente mantiene la misma concentración antes y después de la combustión. El As por otro lado no se libera mayormente (o no se libera en absoluto) en la atmósfera, por lo que es improbable una contaminación diseminada relacionada con las operaciones de combustión. Sin embargo sí existe contaminación por As en los lugares

donde los relaves se han usado como parte del material de construcción, o donde el polvo proveniente de las operaciones de molienda o trituración pudo haberse depositado, y se la encuentra en el sistema municipal de provisión de agua por encima de los niveles permitidos por los estándares peruanos. El arsénico también se puede encontrar en una alta concentración en los sedimentos de aguas pluviales que fluyen sobre suelos contaminados.

Los componentes comunes de As relacionados con la mineralización de Hg son:  $As_2S_3$  (sulfuro de arsénico),  $As_4S_4$  (rejalgar),  $FeAsS$  (arsenopirita), and  $As-FeO_2$  (arsénico con óxido de hierro). Es frecuente también encontrar plomo (Pb) y varios otros metales pesados en concentraciones elevadas, asociados a la mineralización de la ganga con cinabrio.

## **Resultados de la investigación**

### **Naturaleza y extensión**

#### **Suelo (tierra)**

En 2009, las muestras se recogieron en 15 lugares públicos y de fácil acceso en la ciudad como una forma de determinar la distribución general de Hg total en la superficie del suelo. Se sacaron muestras en triple ejemplar a una profundidad de 1 y 3 pulgadas, lo que dio por resultado seis muestras replicadas para el mismo lugar. La nomenclatura de las muestras de 2009 (i.e. H1-fn-1 a) se usó para identificar el área general de donde se las recogió. La primera letra y el primer número (e.g. H1) representan Huancavelica y el número del corte transversal. Las dos letras siguientes (e.g. fn) indican en qué ubicación a lo largo del corte se realizó el muestreo, aplicando los códigos siguientes: nl (fn) = norte lejano, np (nn) = norte próximo, c = centro, sp (ns) = sud próximo y sl (fs) = sur lejano<sup>6</sup>. Los últimos número y letra (e.g. 1 a) representan la profundidad a la cual se tomó la muestra (1 o 3 pulgadas) y la réplica (a,b o c).

Las concentraciones de Hg total están en una escala de 0.1 a 1201 miligramos por kilogramo (mg/kg) en muestras de tierra, 2,5 a 688 mg/kg a la profundidad de 1 pulgada y 1,5 a 90 mg/kg a la profundidad de 3 pulgadas. Se nota una ligera tendencia a que, a mayor profundidad, vaya disminuyendo la concentración, lo que se puede relacionar al método de contaminación. En este caso, la disminución de la concentración en función de la profundidad indicaría que la fuente pudo ser o el aire (es decir la precipitación de las emanaciones de hornos) o los relaves o el polvo de los relaves depositados sobre la superficie del suelo original. Sin embargo, existe habitualmente una clara y visible demarcación entre los relaves (gravilla y arena rojizas/rosáceas) y el suelo original que está por debajo. Sería más difícil visualizar una demarcación en el polvo contaminado.

Catorce de las muestras de superficie, o 61% de las muestras, tienen mayores concentraciones que los 23 mg/kg recomendados por los niveles de detección regionales de USEPA. Este nivel de detección regional (RSL<sup>7</sup>) está basado en las vías de exposición cutáneas, de ingestión y de inhalación (de partículas) que caracterizan la exposición de tipo residencial. El valor de

---

<sup>6</sup> En inglés: *fn=far north, nn=near north, c=center, ns=near south, fs=far south*

<sup>7</sup> RSL: *Regional Screening Level*

detección de 23 mg/kg está basado en la dosis de referencia para HgCl<sub>2</sub>, forma de Hg casi soluble en un 100%, que probablemente no pertenece a las especies predominantes en el suelo de Huancavelica. Sin embargo, para una comparación inicial de las concentraciones en suelo con un valor de detección establecido, se usará aquí el valor de 23 mg/kg. Se presenta una discusión adicional sobre los niveles de detección en lugares concretos en la sección de Determinación de Riesgos, más adelante.

Había dos muestras que parecen estar en áreas que no fueron demasiado afectadas por las emanaciones de los hornos o por la reutilización de los relaves. Se recogieron muestras de H2-fn-1a y H3-ns-1a de las laderas que se elevan cerca de la ciudad y ambas tenían Hg alrededor de 2,5 mg/kg. Sería útil un posterior desarrollo de una concentración de fondo, con más datos, pero un rango de concentraciones de fondo puede desarrollarse usando estos datos junto con la información obtenida de los promedios de la corteza de Hg en zonas mineralizadas y no mineralizadas. Estas concentraciones pueden variar de 0.10 a 10 mg/kg. Estos dos resultados coinciden con las concentraciones de fondo esperadas, basadas en otras zonas mineras de explotación de Hg en el mundo.

En 2009, fueron analizadas las muestras de tierra para Hg total y en un sub grupo de muestras, por lo tanto fueron analizadas las especies químicas de Hg por extracción secuencial selectiva a objeto de conocer las características de la tierra (Robins et al., 2012). En 2010, las muestras fueron recolectadas al interior de 60 viviendas típicas construidas con tierra apisonada y adobe, y se incluyó los ladrillos de adobe, el piso, el polvo superficial y muestras interiores de aire. Luego de la recolección de muestras residenciales en 2010, el total de las 60 muestras de ladrillos de adobe y de polvo del piso fueron sometidas a análisis de Hg total y extracción secuencial selectiva para caracterizar las especies de Hg presentes en las muestras, como también a la aplicación de un fluido gástrico simulado para estimar el porcentaje de Hg total bioaccesible después de la ingestión (Hagan et al. 2014a). Los resultados de los análisis se presentan en las siguientes secciones.

### **Polvo**

Se recolectaron muestras de polvo de la superficie del suelo dentro de las mismas 60 viviendas donde se tomaron muestras de paredes, piso y aire ambiental interior durante el trabajo de 2011. El polvo es probablemente una mezcla de desechos producto de la descomposición de las paredes y los pisos, pero también de polvo exterior pegado a la ropa o a otros objetos que pueden haber sido contaminados afuera. Puesto que una gran parte del ambiente exterior en el área urbanizada de Huancavelica está contaminado con Hg, el polvo generado dentro de la ciudad es una fuente potencial de contaminación que ingresa dentro de la vivienda.

Las muestras de polvo en Ascención evidencian una concentración de Hg total de 17.3 a 413 mg/kg, en San Cristóbal de 9.6 a 153 mg/kg, en Yananaco de 12.2 a 256 mg/kg y en Santa Ana de 2.4 a 21 mg/kg. Para simplificar, los resultados están anotados en mg/kg, pero sin embargo el verdadero resultado del análisis es miligramos por cada toallita de desempolvar. Se debería realizar un análisis adicional de estos datos antes de que los resultados para el polvo sean determinantes para tomar decisiones acerca del proyecto. Por lo general, los resultados para el polvo se relacionan bien con los de muestras de paredes y suelo del mismo lugar. Más de la

mitad de las muestras tenían Hg en concentraciones por encima del EPA RSL<sup>8</sup> genérico de 23 mg/kg y alrededor de 23% de las muestras tienen concentraciones por encima de 75 mg/kg, que es el nivel de detección para sitios específicos. Este nivel de detección se explica más adelante en la sección sobre Evaluación de riesgos. Los resultados de las muestras de Santa Ana fueron los más bajos de los 4 barrios.

### **Paredes de tierra y adobe**

Las muestras fueron recogidas de las paredes de barro del mismo grupo de 60 casas que para las muestras de polvo, piso y aire recogidas durante el estudio de 2011. Los métodos de recolección para las muestras recogidas de los muros y los pisos se describen en Hagan et al. (2013) y Hagan et al. (2014). Las muestras de paredes para Hg total en Ascensión están en un rango de 9.9 a 763 mg/kg, en San Cristóbal de 21.6 a 944 mg/kg, en Yananaco de 26.3 a 1072 mg/kg, y en Santa Ana de 8 a 243 mg/kg. La distribución de las concentraciones de Hg es similar en las paredes de las casas de Ascensión, San Cristóbal y Yananaco; el 73% de las casas estuvieron por encima del índice genérico EPA RSL de 23 mg/kg y alrededor del 55% de las casas estuvieron por encima de los 75 mg/kg. Las paredes de las casas de Santa Ana están menos contaminadas y tienden a tener menos Hg que los 23 mg/kg RSL.

### **Pisos de tierra**

Las muestras fueron recogidas de los pisos de tierra del mismo grupo de 60 casas de donde provienen las muestras de polvo, paredes y aire de ambientes interiores en el estudio de 2011. El Hg total en los pisos de las casas de Ascensión fluctuaron de 16 a 833 mg/kg, en San Cristóbal de 16.7 a 839 mg/kg, en Yananaco de 19.2 a 926 mg/kg y en Santa Ana de 3.1 a 66.4 mg/kg. Los resultados de las muestras de paredes provenientes de casas individuales tienen alguna relación con los resultados de pisos de tierra dentro de la misma casa. Esto era de esperar puesto que las paredes y los pisos muy probablemente se construyeron con los mismos materiales que se encontraban a proximidad de la casa, siendo éste el método común de construcción. En el 76% de las casas, la concentración de Hg estuvo por encima del EPA RSL genérico de 23 mg/kg y en alrededor de 47% estuvo por encima de 75 mg/kg. De la misma manera que en la muestra de paredes, la de pisos presentó resultados más bajos en el vecindario de Santa Ana.

### **Vapor (aire interior)**

Las muestras de aire interior se recogieron en triple ejemplar en las mismas viviendas de donde provenían las muestras de paredes, piso y polvo, haciendo uso de un analizador Jerome 405 Hg que tiene un límite de detección de 0.5 microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). En Ascensión, los resultados para el vapor fluctuaron del índice de detección límite  $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a  $5.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en San Cristóbal del índice de detección límite a  $1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en Santa Ana del índice de detección límite a  $2.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y en Yananaco los resultados fueron en su mayoría inferiores al índice del límite de detección. Alrededor del 40% de las casas tuvieron resultados superiores al índice del límite de detección que a su vez está por encima del nivel de detección de  $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Los resultados para el vapor no coinciden mucho con los resultados para las muestras de paredes,

---

<sup>8</sup> EPA RSL: *Regional Screening Levels of the Environment Protection Agency*. Niveles de Detección Regional de la Agencia de Protección del Medio Ambiente.

pisos y polvo. Por ejemplo, los resultados para el aire interno en Yananaco evidencian que solo 3 de 15 casas tenían vapor de Hg apenas medible, sin embargo Yananaco en general tuvo las concentraciones de Hg más altas en paredes, pisos y muestras de polvo. Además, en la casa con la concentración de Hg más elevada en paredes y pisos y siendo la segunda en concentración más elevada en polvo (de 60 casas), no se detectó Hg en el aire interior. Esto está probablemente relacionado con la variedad de especies de Hg en las muestras de paredes, pisos y polvo. También podría ser con las variaciones en la ventilación o la porosidad o permeabilidad de las paredes y el piso.

La concentración de referencia OMS (RfC) de  $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  se utiliza como nivel de detección. Este punto se discutirá más adelante en la sección sobre Evaluación de Riesgos. Alrededor del 40% de las casas tienen concentraciones de vapor de Hg en el aire interior por encima del nivel de detección.

Paredes, pisos y hasta cierto punto el polvo pueden tener más o menos Hg elemental en los medios y el vapor resultante en las muestras interiores de aire. Esto depende de una cantidad de factores tales como la proximidad de antiguos hornos, la temperatura dentro de la casa, el vapor atenuado por las cubiertas de las paredes o los pisos, la ventilación en la vivienda y la porosidad y permeabilidad de las paredes y pisos. Se presenta más adelante una discusión de los resultados de especiación y Hg total en paredes y pisos.

### Análisis de especiación

Siguiendo el análisis total de Hg en muestras de paredes, pisos y polvo, las muestras de paredes y pisos se analizaron para especiación de Hg por Extracción Selectiva Secuencial (ESS /SSE<sup>9</sup>) según el método de Bloom et al. Los análisis por ESS consisten en la extracción secuencial de diversas clases de compuestos de Hg a través de la digestión química de una muestra utilizando reactivos cada vez más fuertes. El reactivo inicial es el agua deionizada, el segundo reactivo es ácido acético con pH2, el tercer reactivo es hidróxido de potasio 1 molar, el cuarto es ácido nítrico 12 molar, y el quinto y último reactivo es el agua regia (ácido hidrocórico clorhídrico y ácido nítrico). El agua regia es el reactivo utilizado en la extracción para el análisis de metales totales. Todo el Hg contenido en la muestra debería ser oxidado al estado iónico y estar disponible para un análisis espectrográfico con el tiempo de digestión apropiado en el agua regia.

Cada extractante en el análisis por ESS (SSE), fue analizado para Hg utilizando la absorción atómica espectroscópica, utilizando Lumex 951 (Hagan et al., 2014). La tabla siguiente presenta las diferentes extracciones, reactivos y los tipos esperados de compuestos de Hg que fueron extraídos en esa etapa.

**Extracción Selectiva Secuencial de Mercurio**

Paso	Extractante	Descripción	Componentes típicos
F1	Agua DI	agua soluble	HgCl <sub>2</sub> , HgSO <sub>4</sub>
F2	pH 2 HCl/HOAc	“ácido estomacal”	HgO
F3	1N KOH	Compuesto orgánico	Hg-húmicas, Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>

<sup>9</sup> SSE: *Selective Sequential Extraction*

F4	12N HNO <sub>3</sub>	Compuesto fuerte	Trama mineral, Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> , Hg <sup>0</sup>
F5	agua regia	cinabrio	HgS, m-HgS, HgSe, HgAu
suma			Hg total

### **Análisis de la extracción por fluido gástrico simulado**

Luego de completar los análisis ESS, las muestras de pared y piso fueron analizadas utilizando un método de extracción *in vitro*, que tiene por objeto simular la digestión en la extracción del intestino humano o extracción gastrointestinal (GI). El análisis de la GI fue llevado a cabo por Hagan siguiendo el método simple de extracción GI presentado por Schaidler et al., 2007. El proceso de extracción es similar al de extracción de F2 en los análisis ESS, sin embargo trata de mejorar la simulación del entorno estomacal. El estudio de Schaidler et al. sugiere que los resultados analíticos de GI podrían ser similares a la suma de las extracciones F1, F2 y F3.

Existen debates acerca de la posibilidad de extraer la fracción de F3 del estómago humano. Algunos estudios plantean que los F1 y F2 son los únicos compuestos de Hg bioaccesibles (Bloom et al., 2007). Otros sugieren que F3 es bioaccesible en condiciones adecuadas. El método Schaidler no incluye actividades intestinales como la ruptura de las bacterias naturales al interior de los intestinos. El enfoque conservador para esta investigación remedial es asumir que F3 es bioaccesible e incluirlo en la determinación del factor de bioaccesibilidad (FBA). Ninguna evaluación adicional de la fracción F3 será presentada en este documento y la determinación específica en sitio de la fracción bioaccesible se basará en el trabajo de Hagan en el estudio de 2014 sobre la comparación entre ESS y GI.

El siguiente paso en la determinación más representativa de un FBA específico en sitio sería la realización de un estudio *in vivo*, con un macaco o con cerdos. Estos pueden ser muy caros. Varios de estos estudios se han utilizado para determinar As genérico en suelos contaminados por minas en diferentes sitios en los EE.UU. Sin embargo, hubo una correlación limitada entre compuestos similares de As y FBA (comunicación personal Lowney, 2013) lo que sugiere que los parámetros específicos del sitio pueden ser el factor determinante en el desarrollo de un exacto FBA específico de sitio.

### **Resultados de los sedimentos**

Las muestras de sedimentos (SD-1, SD-2 y SD-3) se recolectaron en tres lugares del río Ichu durante la operación de muestreo del mes de junio de 2013. Las muestras se tomaron en sitios de fácil acceso, de corriente suave y con materiales de depósito de grano fino. Siguiendo la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (USCS<sup>10</sup>) y en base a una inspección visual, las muestras consistieron por lo general en arenas de grano fino a mediano, no filtradas y con algunas partículas finas.

Los SD-1 provienen de la parte central de Huancavelica, cerca del mercado local. Los SD-2 se

<sup>10</sup> USCS: *Unified Soil Classification System*



recogieron bajando el río, más o menos a 3 km del sitio de SD-1, en un cañón estrecho que se encuentra alrededor de 1 km de la zona urbanizada de Huancavelica, yendo río abajo desde las ubicaciones de SD-1 y SD-3. Los SD- se recolectaron aproximadamente a 5 km río arriba, hacia el oeste del centro de Huancavelica, a poca distancia del área urbanizada. Los SD-3 se encuentran más arriba de la corriente principal de aguas pluviales en Huancavelica, que probablemente son la fuente primaria de Hg, ya que recogen sedimentos de suelos contaminados por las operaciones de extracción y refinación de mercurio.

Se sometieron las muestras al analizador Lumex 915 que cuenta con un horno, para los análisis de las muestras biológicas. Los resultados de las muestras SD-1 y S-D 2 fueron de 5.700 mg/kg y de 5.400 mg/kg respectivamente. Sin embargo, estos dos resultados salen de la escala de calibración, por lo que no se puede utilizar esos resultados de manera confiable. El resultado de SD-3 fue de 535 mg/kg y se encuentra dentro de la escala de calibración.

Puede ser limitada la calidad de los resultados de SD-1 y SD-2 pero es posible sacar algunas conclusiones a partir de los resultados de las tres muestras. Los resultados de SD-1 y SD-2 están por encima de las concentraciones determinadas río arriba, de 535 mg/kg para SD-3. No deja de ser razonable asumir que los resultados de SD-1 y SD-2 se encuentran posiblemente en un orden de magnitud superior al resultado de SD-3. Sobre la base del lugar donde se tomaron las muestras, la dirección de la corriente del río y las supuestas repercusiones en ese sitio de las operaciones de horneado, esos resultados respaldan la hipótesis de que las fuentes locales de contaminación por Hg han afectado los sedimentos del río Ichu, y lo siguen haciendo. Dichos resultados sugieren también que el Hg en los sedimentos, en Huancavelica y río abajo, son más elevadas que las concentraciones que se encuentran río arriba.

Los valores de detección para Hg total en sedimentos, que están asociados con la bioacumulación de Hg, tienden a ser muy bajos debido a que el Hg en los sedimentos en condiciones anaeróbicas se transforma fácilmente en Metil Hg (MeHg) y luego se biomagnifica en la cadena alimenticia. La guía del Departamento de Calidad Ambiental de Oregón (DEQ) para evaluar la bioacumulación de sustancias químicas de preocupación en los sedimentos (2007), recomienda que las concentraciones de sedimentos de fondo se utilicen como nivel de detección. Esencialmente no es aceptable ningún aumento en Hg en los sedimentos superior al fondo, ya que cualquier aumento de Hg en sedimentos aumentará el potencial de generación de MeHg. El río Ichu es un flujo de media-alta energía que puede limitar el proceso de metilación debido al aumento de la oxigenación y la reducción de condiciones metanogénicas que promueven la reacción bacteriana generada por MeHg. Evaluaciones adicionales sobre los sedimentos en el río Ichu proporcionarían una visión más clara de la metilación del Hg. Sin embargo, debido a la variación en las condiciones de metilación dentro de un sistema de río, así como la naturaleza de itinerancia de los peces, el análisis de tejidos de peces es el método preferido para determinar los riesgos de la ingestión de pescado. Se justifica una evaluación adicional acerca de las especies de pescados del río Ichu y lagos locales que se consumen con mayor frecuencia.

### **Resultados de biomuestra**

Las biomuestras o muestras biológicas consistentes de sangre, orina y cabello se obtuvieron de 34 residentes de Huancavelica durante varios eventos. Esta IR no presentará una evaluación de

los resultados de biomuestras en detalle debido al número limitado de muestras, la naturaleza no-temporal del conjunto de datos, la falta de análisis de las muestras biológicas de los niños u otras poblaciones vulnerables, y el concepto general de que una evaluación de riesgo se fija en los contaminantes de riesgo asociados en el sitio. Además, los resultados en el conjunto de datos de las muestras biológicas no han sido evaluados a fondo y por lo tanto podrían darse conclusiones inexactas, pudiendo manifestarse los efectos de la exposición a Hg y tener consecuencias subclínicas en ausencia de evidencia de muestra biológica.

El concepto de una evaluación de riesgos se orienta a toda la población que pueda verse afectada por la contaminación del sitio, para su uso actual tanto como futuro y debe captar una amplia variedad de usos y escenarios de exposición. Un muestreo único de muestras biológicas de un adulto podría no tomar en cuenta una población sensible, como los niños, o puede ser que no considere un tipo particular de exposición. La evaluación de riesgos intenta dar cuenta de una serie de exposiciones y una variedad de poblaciones sensibles. Los resultados de la evaluación del cabello se pueden encontrar en el estudio preparado por Hagan et al. (2014), "*Mercury Hair Levels and Factors that Influence, Exposure for Residents of Huancavelica, Peru*". Se presenta a continuación un debate acerca de este estudio en la sección de Reservas de alimentos.

### **Reservas de alimentos**

Durante el evento de muestreo en junio de 2013, se analizaron para Hg total varios alimentos que se sirven normalmente en Huancavelica, utilizando el Lumex RA-915 con horno incluido (91C RP) siguiendo el método USEPA 7473. Se muestrearon charque<sup>11</sup> de alpaca, papa, chuño, sangrita (papa y sangre de alpaca), caballa, pollo y cuy (conejillo de Indias). Cada una de las muestras de tejidos excepto las de los peces, se recogieron localmente dentro de Huancavelica. La trucha vino de un criadero de truchas en un lago cercano y la caballa se recogió en el mercado local que importa caballa desde el Océano Pacífico en Lima. La cecina o charque de alpaca fue analizada dos veces y en cada una tenía la concentración de Hg más alta de todas las muestras de alimentos con 14.46 y 29.30 mg/kg. La piel y carne de trucha tenían las segundas concentraciones más elevadas de Hg. con 10,40 y 14,24 mg / kg, respectivamente. La carne de caballa era la siguiente con elevada concentración de Hg a 9,75 mg / kg, sin embargo, no se detectó Hg en la piel de la caballa. Tampoco se detectó Hg en las muestras de tejido restantes en un índice igual o superior al límite indicado por el método analítico, que fue aproximadamente de 1 mg/kg.

Se espera que los peces estén contaminados con niveles elevados de Hg debido al proceso de metilación y la bioacumulación, incluso en las zonas del planeta que presentan una limitada contaminación de Hg en los sedimentos. Sin embargo, los niveles detectados en las muestras de pescado en el Perú durante el evento de muestreo de junio de 2013, están en un orden de magnitud superior a las concentraciones tisulares de peces, comúnmente elevadas en los lagos de Estados Unidos. Los niveles en tejidos de peces en muchos lagos de Oregón varían desde 0,5 a 1,5 mg / kg. Incluso los niveles en tejido de peces en el lago más contaminado en Oregón se consideran anormalmente altos a 3 mg / kg (Embalse Cottage Grove, antigua mina de mercurio Black Butte). El hábitat de los peces, las especies, la actividad depredadora y la edad

---

<sup>11</sup> Charque: *En la región andina, carne cubierta de sal expuesta al sol durante varios días para su deshidratación y posterior conservación* (N.d.T.)

son factores importantes que afectan las concentraciones tisulares de Hg en el pez, así como los factores no biológicos como el carbono orgánico, el oxígeno disuelto, la comunidad bentónica, el potencial de oxidación / reducción y las reacciones de sulfato / sulfuro. Esta es una consideración importante al evaluar Hg en el pescado y tratar de entender el complejo proceso de metilación. También es importante entender que la concentración de Hg total en tejidos de peces es esencialmente la misma que la concentración de MeHg en el tejido, y a raíz de esto, el análisis total de Hg es un método aceptable para la evaluación de los niveles en el tejido de pescado.

Hay una gran variedad de niveles de advertencia de Hg en tejidos, recomendados por organizaciones nacionales e internacionales. Todos ellos se basan en las tasas de consumo de pescado y una dosis de referencia (RfD) para MeHg. Ellos utilizan un cálculo similar de nivel de detección como el cálculo de la ingestión de suelo (tierra) bajo el supuesto de que todo el Hg en la muestra de tejido es bioaccesible, o un FAB de 100%. El Departamento de Calidad Ambiental de Oregon recomienda un nivel aceptable de tejido (ATL<sup>12</sup>) para la ingestión humana de pescado contaminado con mercurio, de 0,4 mg / kg para el consumo de pescado de manera recreacional y 0.049 mg / kg para el consumo de pescado de subsistencia. La Autoridad de Salud de Oregón (OHA) utiliza 0,6 y 0,2 mg / kg para las poblaciones recreacionales y las poblaciones sensibles, respectivamente. Los niveles de advertencia se basan en similares dosis de referencia que también son utilizadas por las organizaciones internacionales de salud. Sin un estudio más a fondo de los niveles de advertencia de organizaciones internacionales de salud, estos niveles pueden utilizarse como una guía para la comparación con las concentraciones de mercurio en las reservas de alimentos en Huancavelica.

El factor determinante en el riesgo del consumo de alimentos es la tasa de ingestión, al igual que la ingestión de tierra. La EPA/US divide a la población de ingesta de pescado en dos clases: (1) público en general, que incluye la recreacional y (2) la de subsistencia, cada una de las cuales tiene una tasa específica de ingestión diaria. Es probable que la mayoría de los habitantes de Huancavelica tengan una tasa de ingestión de subsistencia. Hay una muy alta probabilidad de que una dieta de subsistencia consista en reservas de un tipo o de unos cuantos tipos de alimentos, de ahí que las tasas de ingestión de esos alimentos serán más altas. No se han desarrollado tasas de ingesta de subsistencia específicamente para Huancavelica o similares regiones pobres de los Andes. En general, las tasas de subsistencia se utilizan para las poblaciones afectadas por los productos químicos bioacumulativos como MeHg, y son específicos para la vía MeHg.

Una evaluación adicional de las concentraciones de Hg total en el cabello humano en relación con varios otros factores que influyen en la exposición, encontró que las influencias más importantes en las concentraciones totales de Hg incluían el sexo, la proximidad a las ubicaciones históricas de hornos de mineral, el tabaquismo, la frecuencia de limpieza de la casa y el consumo de pescado; se presenta en Hagan et al. (9 de junio de 2014). La frecuencia de consumo de pescado se relaciona razonablemente bien con un Hg elevado en el cabello, como se esperaba. El estudio recomienda una evaluación adicional para una mejor caracterización del riesgo de exposición al Hg a través de los alimentos, así como la exposición a otras fuentes.

---

<sup>12</sup> ATL: *Acceptable Tissue level*

En base a la evaluación de reservas alimentarias en Huancavelica en junio de 2013, se encontró que tanto el pescado como la alpaca estaban contaminados con Hg total en concentraciones sumamente elevadas. El pescado se contaminó con MeHg como resultado del proceso bien conocido de metilación de Hg en ambientes acuáticos y de la bioacumulación en la cadena alimenticia. Las vías de exposición que pueden explicar las concentraciones de Hg total en alpacas no están claras, aunque puede haber algún tipo de biomagnificación como resultado de las concentraciones de Hg total en suelo, una potencial absorción por especies vegetales locales, y el subsiguiente consumo de plantas contaminadas con Hg. Otras fuentes adicionales de contaminación por Hg pueden resultar del procesamiento y/o del almacenamiento de carne de alpaca previamente a su venta en el mercado local.

El método de conservación de la carne seca de alpaca consiste en cortar la carne en tiras y colgarla de los aleros de las casas para que se seque. Este proceso no ha sido completamente evaluado pero la introducción de polvo contaminado es una fuente probable de contaminación de Hg. El análisis del tejido para Hg utilizando un método de análisis directo total no va a descifrar entre las diversas formas o fuentes de Hg, por lo tanto, las concentraciones elevadas de Hg en el charque de alpaca podría ser tanto interna (biomagnificación dentro de la alpaca) como externa (polvo introducido en el proceso de conservación). El pastoreo en áreas de contaminación podría ser una vía potencial de exposición al Hg de la alpaca u otro ganado. Para determinar el riesgo de la ingesta de alimentos contaminados con Hg, deben llevarse a cabo un análisis adicional de la carne de alpaca, así como de otros tipos de ganado y una evaluación adicional de las tasas de ingestión de distintas reservas de alimentos.

Esencialmente, los análisis preliminares de las reservas de alimentos sugieren que el Hg encontrado en los tejidos de peces y de alpacas sobrepasan los niveles de alerta establecidos para la población en general, sus actividades de recreo y para su subsistencia. Se justifica una evaluación posterior de Hg tanto en las reservas alimentarias como en los índices de ingestión, y de la misma forma se debe tratar de entender la especiación de Hg presente en varios alimentos.

### **Area de contaminación (alcance del impacto)**

El área de contaminación (AOC) es un término que utilizan CERCLA y los Programas de Descontaminación de los Estados Unidos para referirse a los lugares donde aparecen los contaminantes relacionados con el sitio, específicos para cada medio. También se la puede definir como la extensión estimada de la contaminación. Se mencionó más arriba la extensión de la contaminación en cada medio. Esta sección resume el AOC para el lugar concreto. Es importante admitir que el AOC se refiere a cualquier lugar relacionado con la localización de contaminantes, a través de varios medios (i.e. interacción humana, viento, agua pluvial, etc.), independientemente del nivel de contaminación. Las concentraciones no detectadas, al menos en los compendios de datos de este proyecto, así como la contaminación de base, vienen a ser los niveles en que se asume que el sitio no contaminó los medios, en otras palabras, representa el límite del AOC.

La determinación del AOC tiene por objeto evaluar los lugares, actuales o futuros, donde puede haber exposición. La evaluación estándar de riesgos para la salud humana se realiza según un avance gradual, para determinar primero en qué lugar están los contaminantes, determinar luego

qué vías de exposición son relevantes. La misma vía de exposición puede variar según las diferentes áreas del AOC y en algunas áreas puede no haber ninguna vía de exposición y de esta manera el nivel de detección que proporcionan es inapropiado. En cuanto a la evaluación de riesgo, hay dos escenarios de exposición: el residencial y el ocupacional. Se podrá desarrollar más tarde mayores detalles acerca de los escenarios de exposición, si fuera necesario.

El suelo contaminado está ubicado a lo largo del área urbanizada de Huancavelica. Sobre la base de los resultados arriba expuestos, Ascención, San Cristóbal y Yananaco son los barrios más contaminados de los cuatro que fueron detectados respecto al Hg total en casas de barro. El suelo fue contaminado por una diversidad de métodos, incluyendo la deposición de los gases liberados por los hornos, el polvo traído por el viento, el uso de relaves para la construcción y el flujo de aguas pluviales. La contaminación del suelo y del aire al interior de las casas se encuentra en los mismos lugares, de tal manera que el AOC será el mismo para estos medios. El AOC para tierra y aire, en lo que se refiere a esta IR, es el área urbanizada de Huancavelica.

La contaminación del suelo se extiende probablemente hacia las áreas de la mina de Santa Bárbara y de igual forma a caminos antiguos o actuales que vienen de la mina o van hacia ella. El AOC del suelo podría ser mayor, sobre la base de una evaluación adicional pero para los propósitos de esta IR, se considerará como AOC del suelo el área urbanizada de Huancavelica.

El efecto en los sedimentos probablemente se extiende más allá de la AOC definida por este IR y puede incluir las partes altas de la cuenca amazónica tanto como los lagos locales susceptibles de haber sido contaminados por las deposiciones de los gases liberados por los hornos (Cooke et al., 2009). Sin embargo, en este IR, no se considerará los sedimentos más allá de un análisis preliminar, ya que están relacionados con la metilación y la ingestión de pescados dentro y cerca de Huancavelica.

## **Evaluación de riesgos**

La siguiente sección presenta los elementos generales de evaluación de riesgos, según las metodologías de USEPA presentadas en las Orientaciones para la Evaluación de Riesgos para Superfund (RAGS<sup>13</sup>). De manera más específica, la evaluación de riesgos obedece al documento de Orientaciones para la Toma de Decisiones basadas en el Riesgo, del Departamento de Calidad del Medio Ambiente de Oregón. El documento de orientación se preparó, originalmente, para la remediación de sitios contaminados por el petróleo, pero desde los últimos años de la década de los 90, este documento se ha convertido a lo largo y ancho del estado, en un estándar para determinar la evaluación de riesgos para todos los contaminantes peligrosos. Tanto RBDM como RAGS tienen las mismas bases. Dependiendo del estado o del país, algunas variaciones son posibles en los valores de referencia toxicológica que se utilizan para elaborar los valores de detección para un sitio.

Del mismo modo, la evaluación de riesgos utiliza el método determinista de evaluación de riesgos que parte de estimaciones puntuales para determinar la variedad de factores de

---

<sup>13</sup> RAGS: *Risk Assessment Guidance for Superfund*

exposición. La evaluación determinista de riesgos difiere de la evaluación probabilística, en la cual los factores de exposición no son estimaciones puntuales sino una escala de valores que generalmente se distribuyen de manera regular, y que son luego incorporados en los cálculos basados sobre riesgos. Se supone que el método probabilístico es más representativo de la población real, en la que se supone que los rangos de valores reflejan de manera más precisa las variaciones en la población. Los valores de riesgo deterministas se sacan a menudo de los datos sobre distribución, a un 90% por encima del límite de confianza promedio. Esto se define como una estimación de la tendencia central (CTE<sup>13</sup>).

A veces, se puede extraer un cálculo puntual tomando datos más arriba en la escala de distribución a fin de capturar la exposición máxima esperada. Esto se define como la exposición máxima razonable (RME<sup>14</sup>). En otras palabras, la RME es la mayor exposición que se puede razonablemente esperar para una vía de exposición dada en un sitio concreto. Esto tiene por propósito dar cuenta a la vez de una concentración incierta del contaminante y de la variabilidad en los parámetros de exposición (e.g., frecuencia de exposición, tiempo promedio). Hablando de manera general, el método determinista es más sencillo, aunque más conservador, que los métodos probabilísticos. Los valores utilizados en esta evaluación de riesgo son en su mayor parte los valores RME. Se justifica afinar, más adelante, los parámetros de exposición a tiempo de recoger mayor información sobre el estilo de vida en futuras actividades de evaluación.

Los métodos probabilísticos podrían ser utilizados en el futuro si se desarrollaran los parámetros adecuados para la distribución de la exposición para la población de Huancavelica. Cabría señalar que las distribuciones en base a estimaciones puntuales derivadas pertenecen al Manual de Factores de Exposición de USEPA (2011), el cual utiliza los datos de la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (NHANES<sup>15</sup>) tanto como de otras fuentes, que todas se basan en la población de Estados Unidos. Muchos de los factores de exposición pueden presentar diferencias respecto a los factores de exposición que representarían de manera más puntual a la población de Huancavelica. Por ejemplo, el peso promedio de un adulto en los Estados Unidos probablemente difiere del peso promedio de un peruano adulto y seguramente difiere de manera aún más significativa del peso promedio de un adulto de origen nativo andino. Los índices de ingestión diaria también pueden variar en gran medida comparados a los promedios norteamericanos basados en las condiciones o estilos de vida. La evaluación de riesgos utiliza los factores estándares de EPA que fueron incorporados en los cálculos del RBDM de Oregón en cuanto a la mayoría de los factores de exposición. Varios factores de exposición específicos del proyecto fueron utilizados en esta evaluación de riesgos, los que se explican más adelante en las secciones de Vías y Receptores de Exposición.

Se puede asumir que la población en los países en desarrollo tendría prácticas de higiene diferentes, en primer lugar debido a la falta de posibilidades de acceder de manera regular al agua limpia, tendría mayores índices de ingestión casual debido a que vive en ambientes con más polvo y con una infraestructura urbana menos desarrollada o debido a que trabaja en posiciones típicas en entornos agrarios / al aire libre o al tipo de trabajo de peón. La falta o la falta potencial de educación y de información acerca de las sustancias peligrosas así como la

---

<sup>14</sup> RME: *Reasonable Maximum Exposure*

<sup>15</sup> NHANES: *National Health and Nutrition Examination Survey*

falta de un conocimiento elemental de toxicología aumentan la probabilidad, para la población de países en desarrollo, de quedar expuesta a contaminantes.

El único factor y el más importante, tanto para la población de países industrializados como los Estados Unidos y países en desarrollo, es el nivel de ingresos. Esto constituye una reflexión de gran importancia para la elaboración de valores de evaluación específica del lugar. Teniendo esto en mente, allí donde está limitada la información sobre parámetros de exposición, el parámetro de exposición caerá hacia el lado conservador.

También se debería señalar que cuando se añade un parámetro conservador de exposición a otro parámetro conservador, los valores finales de evaluación pueden resultar conservadores en exceso. Es importante entender esto cuando se comparan los valores del sitio con los valores finales de evaluación. También es importante comprender cuales parámetros de exposición influyen en mayor grado en los valores finales de evaluación. Este punto se discutirá más adelante en la sección sobre Evaluación de Riesgos.

Se debería desarrollar en el futuro un documento más detallado sobre el parámetro de exposición, con evaluaciones estadísticas de RME, CTE y riesgo acumulativo, para dar mayor soporte y confiabilidad a los factores de exposición utilizados en esta evaluación de riesgos. Sin embargo, porque las concentraciones de mercurio al interior de las viviendas son significativamente elevadas, y porque las estimaciones de exposición utilizadas en la evaluación de riesgos son conservadoras, se justifica una acción remedial sin necesidad de una mayor evaluación de riesgos. La evaluación adicional de riesgo acumulativo (i.e. la exposición a otros metales pesados tales como el arsénico o el plomo) puede revelar un riesgo mayor a aquel que se obtiene en esta evaluación de riesgo.

Un ejemplo de la manera en que el riesgo acumulativo podría presentar un riesgo mucho más alto que el que fue estimado en este IR, es el riesgo acumulativo de comer pescado contaminado y de vivir en una casa contaminada. Es posible que una persona que vive en una casa contaminada (i.e. inhalando vapor de Hg) esté expuesta al riesgo de manera total, pero a esto se añade que el pescado contaminado forma parte de su dieta. En este caso, el riesgo total quedaría sustancialmente subestimado. Por este motivo, una evaluación adicional de riesgo, junto con una evaluación de los recursos alimentarios, constituye una importante tarea para este proyecto en el futuro.

## **Modelo Conceptual de Sitio**

El modelo conceptual de sitio (CSM<sup>16</sup>) presenta las diversas fuentes contaminantes, dónde se encuentran, los diversos medios que permitieron la localización y transmisión de la fuente, las vías completas de exposición (varías vías por las que puede ocurrir la exposición) y los tipos de receptores.

Cuando un receptor llega a quedar expuesto al contaminante a través de un medio en particular, la vía de exposición se considera completa. Si la vía es incompleta, la magnitud de la fuente o el nivel del contaminante no son motivo de preocupación, porque el receptor no quedará

---

<sup>16</sup> CSM: *Conceptual Site Model*

expuesto. Es importante recordar que es posible que un contaminante esté por debajo de un valor de detección aún en el caso de vías completas de exposición. El propósito de desarrollar un CSM es de determinar dónde están completas las vías de exposición, lo que entonces da una base para saber qué valores de detección se pueden utilizar para una comparación. Si el contaminante, en el caso de una vía completa, está por encima del valor de detección, entonces puede existir un riesgo inaceptable y es necesario proceder a un análisis más detallado o a una descontaminación. Se presenta una discusión acerca de los diversos valores de detección en la sección sobre Evaluación de riesgos.

## **Fuentes**

Tal como se presenta en la sección de Resultados de la Investigación, más arriba, existen varias fuentes de contaminación. La fuente original de una contaminación primaria puede estar relacionada a la mina de Santa Bárbara ya que, entre 1500 y 1800, el mineral era transportado al valle y quemado en varios hornos. Los relaves (calcina o mineral quemado) también pudieron ser traídos de la mina y utilizados en proyectos de construcción en Huancavelica, y de igual modo con los relaves que pudieron generarse a proximidad de los hornos.

Existen varias fuentes principales asociadas con el mecanismo de la calcinación del mineral. Estas son:

- precipitación de los escapes de hornos
- residuos incidentales de roca del mineral y relaves (calcina)
- mineral no utilizado cerca de los hornos
- polvos o partículas más finas asociado con molienda
- fugas o derrames de Hg elemental (después de la destilación) de la refinación, procesamiento y transporte

También puede haber una contribución natural desde el yacimiento que está expuesto a la erosión y, posiblemente, de la deposición histórica de aluviones de Hg en el valle del río Ichu (Berry y Singewald) como en Huancavelica y sus cercanías. El yacimiento probablemente sigue las fracturas asociadas con la zona de falla, pero en los estudios presentados en este informe, no se identificaron datos sobre la localización detallada. Independientemente de ellos, pueden incluirse con las otras fuentes antropogénicas el cinabrio, el meta-cinabrio y el Hg elemental de origen natural, como fuentes contaminantes.

Los métodos estándar de evaluación de riesgos intentan tamizar los riesgos de los niveles de fondo, debido a que es limitada la capacidad de descontaminar extensas fuentes de fondo. Sin embargo, con base en los resultados del modelo histórico de escapes de horno presentado en Robins, 2011, el riesgo de fuentes generadas por las operaciones históricas de hornos es mucho mayor que el riesgo de las contribuciones de origen natural. Esto tiene que ver con los tipos de especies de Hg (HgS, HgCl<sub>2</sub>, Hg<sup>0</sup>) asociados con las fuentes de origen natural frente a la variedad de las especies más biodisponibles asociadas con escape de hornos. Esto también tiene que ver con la limitada accesibilidad a las fuentes del subsuelo asociados con compuestos de Hg de origen natural, en comparación con los suelos superficiales contaminados, de fácil alcance alrededor de las ubicaciones históricas de hornos.



Un remedio común y rentable para el tratamiento del suelo contaminado es sellarlo con una capa limpia. Esto puede haber ocurrido de forma natural durante milenios por el proceso de erosión, en que la tierra limpia proveniente de lugares más altos se deposita encima del material mineral erosionado de forma natural. Además, los compuestos de Hg más móviles generados durante las operaciones de hornos pueden haber sido lavados aguas abajo puesto que se generaron y depositaron en los sedimentos del Río Ichu y otros cursos de agua río abajo. A pesar de ello, el suelo contaminado con Hg de las operaciones de los hornos, que incluye la mayor parte de los suelos a lo largo de Huancavelica, es una fuente de exposición de Hg.

Las principales fuentes de contaminación en las que se centra la Evaluación de Riesgos son fuentes secundarias de contaminación por Hg asociadas a la construcción de casas en base al uso de tierra contaminada por Hg, a partir de fuentes primarias. Estas son:

- Paredes de tierra apisonada y adobe
- Suelos de tierra
- Polvo de las paredes, pisos y suelos de los alrededores al exterior de la casa

### **Vías de exposición**

Existen dos vías principales de exposición en Huancavelica, que permiten al Hg ingresar en el cuerpo humano. Se trata de la inhalación de vapores de Hg y la ingestión accidental de partículas de compuestos de Hg. Éstas son consideradas vías de exposición completas.

#### ***Inhalación de vapor de Hg***

En base a las mediciones de vapor de Hg recogidas en el año 2010 y el porcentaje del total de Hg presente en paredes y suelos como Hg elemental, como se midió en el análisis ESS, existe la probabilidad de que la fuente de vapor de mercurio en el aire interior sean las paredes y el suelo contaminados. Los resultados de la medición de vapor en el 2010 indican que las concentraciones interiores de vapor de mercurio elemental estaban por encima de la concentración de referencia (RfC) de la EPA/US de  $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y también por encima del nivel de detección de exposición crónica de la OMS de  $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Hoja informativa sobre la exposición al mercurio, 2007, OMS). Debe señalarse que los dispositivos analíticos utilizados para la evaluación de vapor de Hg varían enormemente en cuanto a los límites de detección. Tal como se presenta en los resultados de la sección de Resultados sobre aire interior, el Jerome 405, utilizado para el trabajo de evaluación de vapor (Robins, 2011) tiene un límite de detección de  $0,5 \mu\text{g} /\text{m}^3$ . Fundamentalmente, ninguna detección con el Jerome 405 estará por encima de la concentración de referencia (RfC) de la EPA US y el nivel de detección de la OMS. Esta vía de exposición es probablemente la más significativa.

Sigue una breve lista de los escenarios específicos de exposición que se cree pueden existir en Huancavelica, y de los rangos presumibles de concentración del vapor de Hg. Los rangos de datos se basan en el análisis real de vapor llevado a cabo por Robins, Halabi, Hagan y Espinoza (2010) y Robins, Thoms, Ecos y Espinoza (2013) para Huancavelica, y en varios estudios sobre el entorno global (OMS) y los proyectos de descontaminación en Oregón (minas de Bonanza y Black Butte) y USEPA.

- Respirar aire ambiente exterior fuera de Huancavelica - 0.002 a 0.01  $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Respirar aire ambiente exterior en el área urbanizada de Huancavelica - 0.002 a 0.030
- Respirar aire en ambientes interiores en Huancavelica - 0.2 a 5.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (la máxima podría ser más elevada)
- Respirar aire a mucha proximidad de Hg elemental visible (i.e. en construcciones) – 1 a 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

La vía de exposición al vapor de Hg más difundida y común en Huancavelica es la inhalación de aire al interior de ámbitos residenciales de casas construidas con barro y contaminadas con Hg. La vía de inhalación de aire interno puede dividirse en dos escenarios según la duración de la exposición: residencial, que supone un tiempo de exposición de 24 horas por día durante 30 años, y ocupacional, que supone un tiempo de exposición de 8 horas por día durante 7 años. Las concentraciones de Hg en el aire externo fluctúan de manera importante debido a los patrones de viento y los cambios de temperatura durante el día y tienden a ser muy inferiores a las del aire interno. Respirar en ambientes exteriores sigue siendo una vía completa, pero de menor motivo de preocupación.

Para entender mejor la variedad de exposiciones, se lista a continuación algunas vías de exposición por inhalación de vapor de Hg:

- inhalar vapor en un ámbito residencial dentro de casas de barro contaminadas con Hg, durante un período regular de permanencia en el hogar
- inhalar vapor en un ámbito residencial mientras se está cocinando en un horno o una cocina de barro contaminado con Hg o a proximidad de una pared de barro contaminado por Hg
- inhalar vapor mientras se trabaja en una edificación de tierra contaminada con Hg
- inhalar vapor mientras se trabaja en áreas al aire libre que pueden, en el suelo, tener un índice de Hg elemental más elevado que los niveles de base locales

Existe una variedad de vías de exposición específica que pueden ampliarse en formas de exposición mucho más precisas. Sin embargo, para los propósitos de esta evaluación de riesgos, la vía de exposición por inhalación de vapor se limitará a las categorías generales de exposición residencial en ambientes interiores y de exposición ocupacional en ambientes exteriores.

### ***Ingestión accidental, contacto cutáneo e inhalación de tierra***

En esta sección, “suelo” alude a suelos exteriores, paredes de tierra (tierra apisonada, adobe), pisos de barro y polvos generados por esos materiales. Esta vía comporta tres accesos específicos: la ingestión, el contacto cutáneo y la inhalación. La inhalación de partículas cargadas de Hg en el polvo se incluye en la vía de ingestión accidental porque el polvo que entra en nariz y boca en su gran parte será incorporado a las mucosidades que ingresan al tracto gastrointestinal. Además, en la vía por contacto cutáneo, se asume que los compuestos de Hg no entrarán al cuerpo a través de la absorción por la piel, sino por la ingestión accidental de tierra que se ha adherido a la piel y que al final acaba siendo ingerido por las interacciones mano-boca. La vía de contacto cutáneo incluye la absorción dérmica de Hg elemental, pero resulta mucho más probable que la inhalación de vapor y la ingestión de tierra sobrepasen en importancia esa vía. Del mismo modo, en cuanto al escenario ocupacional en que se encuentra

Hg elemental durante las excavaciones u otras actividades en la superficie, el riesgo por inhalación de vapor es mayor que el riesgo por contacto cutáneo.

Algunas de las exposiciones específicas englobadas en esta vía serían las siguientes:

- Inhalación de partículas de polvo al interior y al exterior durante las actividades diarias
- Ingestión / inhalación dentro de la vivienda de partículas de tierra desprendidas del piso y de las paredes mientras se limpia o se realiza tareas de mantenimiento de la estructura
- Ingestión de partículas de tierra adheridas a los alimentos, como papas o charque
- Ingestión de partículas de tierra a partir de interacciones mano-boca

Se podrá más adelante perfeccionar la descripción de exposiciones específicas como apoyo a una evaluación de riesgos más precisa. Sin embargo, para los fines de esta evaluación de riesgos, la vía general de exposición incluirá las vías específicas de ingestión accidental, contacto cutáneo e inhalación. En esta sección, cabe recordar que el término “inhalación” se refiere a la inhalación de partículas que contienen Hg y no de vapor, que está clasificado en una vía totalmente separada (ver más arriba).

El modelo basado en riesgos para la ingestión de tierra contaminada utilizado por USEPA y el DEQ<sup>17</sup> de Oregón, incluye una cantidad de diferentes parámetros de exposición que pueden ser modificados o adaptados para que correspondan a la exposición real, tal como se explica al empezar la sección sobre Evaluación de Riesgos. Puesto que los efectos tóxicos de la ingestión de Hg y de compuestos de Hg son acumulativos según la cantidad de Hg ingerida, el parámetro principal de exposición es el índice de ingestión. El índice de ingestión de tierra porcentual más alto por defecto (incluyendo el polvo) recomendado por USEPA para todas las edades es de 200 mg/día (*Exposure Factors Handbook*, 2011). La tendencia central para el índice de ingestión de tierra (incluyendo polvo) es de 60 mg/día para 0 a 1 año de edad, 100 mg/día para 1 a 21 años de edad, y 50 mg/día para mayores de 21 años. Estos valores se desprenden de distintos estudios basados en factores de exposición para residentes norteamericanos. Debido a que las condiciones de vida en Huancavelica difieren considerablemente de las de los Estados Unidos, conviene considerar una modificación del índice de ingestión para adecuarse mejor a las circunstancias de Huancavelica.

No existen estudios específicos de ingestión de tierra para la población de Huancavelica o de la región andina. Investigadores de la Universidad estatal de Oregón llevaron a cabo una revisión de los estudios sobre ingestión de tierra para respaldar la derivación de índices de ingestión de tierra para el estilo de vida actual en una tribu perteneciente a la Confederación de Tribus de la Reserva India de Umatilla (CTUIR<sup>18</sup>) (Harper, 2004). La revisión consideró una gran variedad de actividades en que la exposición está asociada a condiciones de supervivencia, lo que incluye realizar trabajos agrícolas, consumir raíces, participar en eventos rituales, cabalgar y cavar tumbas. En base a ese análisis, se determinó un índice de ingestión de 400 mg/día como promedio razonable para el estilo de vida de niños y adultos. El estudio de CTUIR reporta 1g/día como un límite máximo razonable para actividades como recoger raíces. En función de la disponibilidad de agua, varía mucho la cantidad de tierra que se desprende del lavado de papas u otros tubérculos. De igual manera, la producción de chuño, que consiste en congelar y

---

<sup>17</sup> DEQ: *Department of Environmental Quality (Departamento de Calidad Ambiental)*

<sup>18</sup> CTUIR: *Confederated Tribes of the Umatilla Indian Reservation*

descongelar papas al aire libre durante varios días, puede facilitar que partículas de tierra se incrusten en el tejido de las papas. El hecho es que existe una diversidad de vías por las cuales partículas de tierra contaminada pueden introducirse en los alimentos o adherirse a ellos.

Sobre la base de debates con los miembros de AN en Huancavelica (comunicación personal, Espinoza, 2013), la forma de vida de mucha gente que vive en Huancavelica o en sus alrededores puede asimilarse a la de la población a la que se refiere el estudio de CTUIR. Además, tener una dieta donde abundan las raíces, vivir en ambientes sumamente secos y en construcciones de barro, deja suponer que la gente de Huancavelica tenga incluso índices de ingestión de tierra más elevados que la CTUIR. Este estudio plantea que los valores por defecto usados por USEPA podrían no ser representativos de los reales índices de ingestión de los habitantes de Huancavelica, especialmente en el caso de las familias más pobres que probablemente tienen un nivel de vida de subsistencia. Al carecer de una evaluación más profunda acerca de la dieta y estilo de vida de la gente de Huancavelica, una tasa razonable de ingestión diaria podría ser de 400 mg/día, para todas las edades.

Otro factor importante en la derivación de valores de evaluación específicos al lugar es el factor de bio-acumulación (FBA) que fue presentado en la sección de Resultados de la Investigación. Los rangos de los FBA en SSE y GI son de 0.2% a 21.2% y de 0% a 7.9% respectivamente. El FBA de la base de datos en la ESS es de 1.2% y 1.0%. El estudio de Hagan et al. De 2014, presenta resultados ligeramente diferentes, debido a una evaluación más rigurosa del punto de visto estadístico. Al no disponer de una evaluación más amplia y de un análisis más profundo de los datos, una estimación conservadora del FBA para todos los medios que contienen tierra es en este IR de 10%. Sería conveniente considerar que alrededor del 10% de las casas tienen un FBA en ESS superior al 10%. Los FBA en GI fueron por lo general inferiores a los FBA en ESS. Es también importante tomar en cuenta la variabilidad de los resultados para FBA. Manteniendo esto en mente, se considera que un enfoque conservador para la determinación de FBA específicos en el lugar, es adecuado para fines de niveles generales de detección. Se presenta un debate complementario sobre los factores específicos de exposición en las secciones sobre Receptores y Detección de Riesgos, más adelante.

## **Receptores**

Se puede dividir a los receptores en varias categorías generales. Según los cálculos de RBC y RBDM que es similar al cálculo de RSL, de EPA, existen dos grupos principales basados en el tiempo de exposición: residencial y ocupacional. El escenario residencial para habitantes de Estados Unidos asume que el receptor está expuesto al contaminante 24 horas al día, 7 días por semana, 350 días por año (con 15 días de viaje lejos del hogar), durante 30 años. El escenario ocupacional asume que el receptor (empleado, en Estados Unidos) está expuesto al contaminante durante 8 horas por día, 5 días por semana, por 250 días por año durante 7 años. Se ha modificado la frecuencia de la exposición de ambos escenarios para residentes y trabajadores en Huancavelica (ver más abajo).

Además, los factores de exposición deben ser elaborados para simular la exposición que puede sufrir un niño, la cual incluye factores de exposición residencial y modifica algunos de ellos (i.e. el peso corporal, los índices de ingestión) para hacerlos más conservadores. En cuanto a la vía de inhalación de vapor, no se utilizan los factores específicos del sitio porque son escasos los

modelos para derivar valores de evaluación específicos para la inhalación de vapor de Hg. Por otra parte, los índices de inhalación diaria no varían de manera significativa entre las diferentes poblaciones, a excepción de los diferentes rangos de edad. En lo referente a la inhalación de vapor de Hg, no se modifica la concentración de referencia desarrollada por USEPA ( $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ni la RfC de la OMS ( $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). La más baja de las dos ( $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) se usará como valor de detección para el vapor.

En cuanto a esta evaluación de riesgo para la salud humana, hay tres categorías de receptores: ocupacional, adulto residencial y niño residencial. Las categorías adicionales de receptores podrán ser desarrolladas más profundamente, pero para la evaluación de riesgo, se utilizarán estas tres como una estimación de riesgo de tipo conservador.

Los siguientes son los factores de exposición que tienen mayor influencia en cada categoría de receptor. Puesto que el riesgo residencial en niños sobrepasa de mucho el riesgo residencial en adultos, el nivel de detección específica del sitio para niños residentes será el nivel de detección para este proyecto. En instalaciones ocupacionales reales sin niños, se podrá utilizar el nivel de detección ocupacional. Para las tres categorías, se manejarán los RfC de WHO de  $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como valor de detección para la inhalación de vapor de Hg.

**Ocupacional** (solamente vía de ingestión de tierra)

Peso corporal = 70 kg  
Tiempo de exposición = 25 años  
Frecuencia de exposición = 250 días/año  
Índice de ingestión = 400 mg/día

**Residencial - adultos** (solamente vía de ingestión de tierra)

Peso corporal = 70 kg  
Tiempo de exposición = 30 años  
Frecuencia de exposición = 365 días/año  
Índice de ingestión = 400 mg/día

**Residencial - niños** (solamente vía de ingestión de tierra)

Peso corporal = 10 kg  
Tiempo de exposición = 6 años  
Frecuencia de exposición = 365 días/año  
Índice de ingestión = 400 mg/día

**Detección de riesgos**

A continuación se presentan las concentraciones basadas en riesgo (RBC) o niveles de detección utilizados para la detección de riesgos y un debate general sobre la comparación de los RBC con las concentraciones contaminantes del sitio. Cuando los datos de los contaminantes están por encima de los RBC, existe un riesgo inaceptable y es más, debería llevarse a cabo una evaluación más detallada del riesgo o desarrollarse alternativas de remediación para la comparación en el estudio de factibilidad. El costo y el tiempo necesarios para llevar a cabo la evaluación del riesgo adicional probablemente se habrán agotado sin que los resultados sean muy diferentes.

Usando el cálculo de los niveles de detección basados en la ingestión genérica, como sigue:

Valor de detección (RBC)

$$\frac{IRIS \text{ HgCl}_2 \text{ RfD} \times \text{peso cuerpo (10 kg para niños)}}{400 \frac{\text{mg tierra}}{\text{día}} (\text{promedio de ingestión diaria}) \times 0.1 (\text{FAB}) \times 0.000001 \frac{\text{kg tierra}}{\text{mg tierra}} (\text{unidades de conversión})}$$

Donde:

IRIS<sup>19</sup> HgCl<sub>2</sub> RfD (dosis de referencia) = IRIS dosis de referencia de 0,0003 mg/kg/día Hg

Ingestión diaria = 400 mg/día, tanto para niños como para adultos

FAB = factor de bioaccesibilidad del 10% sobre la base de resultados de ESS y GI

La ecuación de derivación de Concentraciones Basadas en Riesgo (RBC) utilizada en el cálculo de RBC de RBDM de Oregón específica de sitio, es la misma que la presentada arriba. Cada uno de los tres escenarios de los receptores tiene un nivel individual de detección de ingesta de tierra basado en los factores de exposición receptor específico utilizando el cálculo anterior. Los siguientes son los RBC específicos del sitio para los diferentes escenarios de receptores.

### **Ocupacional**

Ingestión de tierra – 770 mg/kg

Inhalación - 0.2 □g/m<sup>3</sup>

### **Residencial - adultos**

Ingestión de tierra – 520 mg/kg

Inhalación - 0.2 □g /m<sup>3</sup>

### **Residencial - niños**

Ingestión de tierra – 75 mg/kg

Inhalación - 0.2 □g/m<sup>3</sup>

## **Resumen de Evaluación de Riesgos**

Las concentraciones de vapor de Hg (aire de interior) sólo en el escenario residencial presentan un riesgo por lo menos en un orden de magnitud por encima de los estándares de USEPA y OMS. Las concentraciones de tierra se sitúan en un rango de uno o dos órdenes de magnitud por encima de la RBC específica del sitio en el escenario residencial y unas cuantas muestras de suelo en exteriores tienen Hg total por encima de los niveles de detección específicos para el entorno ocupacional. Se podría realizar una evaluación adicional sobre la vía de ingestión de tierra, así como una especiación más detallada o un análisis de bio-accesibilidad *in vivo*. Sin embargo, en base al riesgo de inhalar vapor de Hg, independientemente de un análisis suplementario, se requiere una acción de remediación. Remediar el riesgo ligado al vapor también remediará el riesgo de ingestión de tierra al interior de las casas, asumiendo que recubrir

<sup>19</sup> IRIS: *Integrated Risk Information System* - Sistema de información integral de riesgos

paredes y pisos con un material poco permeable o impermeable también disminuiría la exposición residencial a partículas desprendidas de paredes y pisos.

Se podría fijar otro nivel de acción o de prioridad en una concentración de  $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , que es utilizada como el nivel de acción para relocalización de urgencia de residentes por varios programas regionales de remoción de USEPA. Además, dichos programas recomiendan la inmediata relocalización de los residentes cuando el vapor de Hg excede los  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Al comparar los datos del sitio con los valores de detección específicos al sitio se estima un riesgo significativo para la categoría de receptor niño residencial, un riesgo de moderado a significativo para la categoría de receptor adulto residencial y un riesgo limitado para la categoría de receptor ocupacional. El riesgo individual puede variar en función de factores de exposición variables tales como el tiempo de permanencia en interiores, el peso corporal, la higiene, el consumo de pescado y muchos otros factores. La conservación se enmarca en los niveles de detección para dar cuenta de las variaciones en los factores de exposición.

## **Conclusiones y Recomendaciones**

El suelo en ambiente externo, las casas de tierra, el aire interior, los sedimentos y los alimentos en Huancavelica y sus alrededores están contaminados con Hg debido al tratamiento histórico de Hg asociado con las operaciones mineras de la era colonial en la cercana mina de Hg de Santa Bárbara. El Hg total en suelo y en casas hechas de tierra en Huancavelica está por encima de las concentraciones basadas en riesgos para uso residencial en alrededor de 50% de las casas. El vapor de Hg en casas construidas con tierra contaminada está por encima del nivel de detección o RfC para uso residencial, en 40% de las casas. En términos generales, 45 de 60 casas o sea el 75% tienen por lo menos un resultado promedio superior al valor de detección respectivo. Muchas de esas 45 casas tienen más de un resultado promedio superior a los valores de detección respectivos. El conjunto de muestras de 60 casas es un grupo representativo de una población más amplia de gente y de viviendas.

La población de Huancavelica en 2014 fue 47,000 (INEI, 2014). Con una tasa de crecimiento anual de 1.6%, la población en 2015 es aproximadamente 48,000 habitantes. Alrededor de 50% de las casas están construidas con materiales derivados de la tierra local. En base a los resultados presentados en la IR, cerca del 75% están en la situación potencial de ser contaminadas a niveles superiores a los niveles de detección y representan un riesgo para la salud humana. En otras palabras, 19.000 personas pueden estar expuestas a niveles de Hg en tierra y/o vapor superiores a los niveles internacionales de detección basados en la salud y están potencialmente en riesgo de sufrir efectos adversos sobre su salud.

Alrededor del 20% de las casas tienen potencialmente en su ambiente interno vapor de Hg por encima de nivel que determina la relocalización. Esto involucra aproximadamente a 3.800 personas que se encuentran en condiciones que representan un serio riesgo de exposición al vapor de Hg, y que pueden necesitar que sus casas sean saneadas o remplazadas tan pronto como sea posible. Los niveles de detección y los niveles de desarrollo en la detección específica del

lugar, en este IR, se basan en estudios toxicológicos ampliamente reconocidos y respaldados por USEPA, ATSDR<sup>20</sup>, OMS y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Además, en varias zonas de Huancavelica existe contaminación en la superficie del suelo, en concentraciones superiores a los índices para uso ocupacional. En el río Ichu, el Hg en sedimentos sobrepasa de manera significativa los niveles de detección de metilación. Sobre la base de un muestreo reducido, la carne de pescado y alpaca puede estar contaminada de manera apreciable por encima de los niveles de consumo basados en riesgo. Esta carga suplementaria de Hg para la salud humana muy probablemente se añade a las cargas residenciales presentadas más arriba.

Los factores de exposición repercuten sobre la exposición individual al Hg. En este IR se trata de determinar las concentraciones adecuadas basadas en el riesgo en función de los factores de exposición específicos del sitio. Cuando no se pudo determinar de manera segura un factor de exposición, se hizo una estimación de tipo conservador.

En base a la información presentada en la Investigación remedial, el CSA formula las recomendaciones siguientes:

#### **En ámbitos residenciales –**

- Las casas en las que el polvo, las paredes y los pisos contienen Hg por encima del nivel de detección para la ingestión o del RBC de 75 mg/kg deberían ser consideradas para sanear o remplazar para reducir el riesgo para los residentes actuales y futuros.
- Las casas con Hg en el aire ambiente por encima del nivel de detección de la OMS de 0.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  deberían ser consideradas para sanear o remplazar para reducir el riesgo para los residentes actuales y futuros.
- Se debería realizar una evaluación de las casas en cuanto a otros metales pesados asociados con la mineralización de la ganga de cinabrio. Los metales más preocupantes son el arsénico y el plomo y se encuentran probablemente en concentraciones elevadas en los lugares donde hay un índice alto de Hg o donde los relaves de las minas están a la vista.
- La difusión debería seguir realizándose entre el público en general y presentando los riesgos a las autoridades civiles locales, regionales y nacionales y dando recomendaciones sobre las maneras en que los particulares pueden reducir el riesgo de contaminación por Hg y otros metales pesados.

---

<sup>20</sup> ATSDR: *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades)



- Si posible, todas las casas de tierra de Huancavelica deberían ser evaluadas para Hg total en paredes y pisos y vapor de Hg en el aire ambiente interior, y se tendría que tomar las medidas adecuadas.

### **En ámbitos ocupacionales y Recomendaciones Generales -**

- Los ámbitos ocupacionales en los que el Hg en suelos es superior a 770 mg/kg o en los que el vapor de Hg es superior a  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para un periodo de 8 horas, o en que el Hg elemental está visible, deberían tener una señalización de advertencia y se debería crear y utilizar protocolos de seguridad para los trabajadores.
- Se debería evaluar el tenor en arsénico total en el agua subterránea utilizada para consumo humano, tanto de pozos como de manantiales.
- Se debería evaluar para Hg a los peces del río Ichu a proximidad de Huancavelica, que suelen ser consumidos por la gente, así como los peces que se producen localmente.
- Una evaluación de Hg debería realizarse en otro tipo de reservas de alimentos, como son la alpaca, la llama, el cuy, el pollo y las papas, así como en el ganado que suele pastar en Huancavelica y que se consumen de manera usual.

Como apoyo al desarrollo de un EF, el CSA está desarrollando un proyecto piloto, con el objeto de reducir la exposición tanto para las partículas de Hg como para el vapor de Hg en las casas prioritarias. El proyecto piloto está planificado para junio/julio de 2015. La meta es probar varias acciones remediales preliminares y evaluar y presentar los resultados a las partes afectadas, las autoridades civiles y los financiadores potenciales. Se tiene la esperanza de que se desarrolle una acción remedial económica, adecuada al lugar, simple y segura.

### ***Descargo de responsabilidad y limitaciones***

El autor principal de este documento trabaja para el Departamento de Calidad del Ambiente de Oregón, sin embargo, este informe no está respaldado por este Departamento o por las autoridades en salud de Oregón, ni los fondos utilizados en la preparación de este informe y en las actividades de evaluación asociadas a este proyecto provienen del Estado de Oregón. El autor principal es un geólogo registrado en el Estado de Oregón (Estados Unidos) y, como tal, veló por que este documento fuera elaborado siguiendo las normas y la ética profesionales asociados con la certificación profesional en el marco de la Junta de Examinadores de Geólogos del Estado de Oregón. No existe tendencia religiosa o política alguna en las recomendaciones y conclusiones de este informe. La motivación del autor principal para desarrollar este informe es únicamente promover el bienestar humano.

La información presentada en este informe fue recogida, analizada e interpretada siguiendo los estándares de cuidado, conocimiento y diligencia que comúnmente caracterizan a un profesional en el cumplimiento de actividades similares a las que fueron llevadas a cabo durante este tiempo. Este informe y las conclusiones y/o recomendaciones que contiene tienen por única base la investigación y/o las observaciones, el muestreo físico y las actividades de análisis que fueron realizadas. La calidad de la información, las conclusiones y estimaciones incluidas están basadas en; i) información disponible durante el tiempo de preparación, ii) datos proporcionados por fuentes exteriores y iii) las suposiciones, condiciones y calificaciones descritas en este informe.

## **Referencias**

- ATSDR Fact Sheet; *Analysis of Hair Samples; How do hair sampling results relate to environmental exposures?*; Abril 2003
- ATSDR; *Suggested Action Levels for Indoor Mercury Vapors in Homes or Businesses with Indoor Gas Regulators*; Letter consultation from ATSDR to Mr. Brendan Boyle, Michigan Health, and Mr. Ralph Dollhopf, EPA Region V; Diciembre 2000
- ATSDR; *Toxicological profile for mercury*; U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; Atlanta, GA; 1999. Disponible en: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp.asp?id=115> HYPERLINK "
- Arana, 2-3; Strauss, 562-63; Yates et. al., 2; Dueñas, 160; Singewald, 518; Loveday, 83; Juan Torrico y Mesa, "Excursión al departamento de Huancavelica," in *Boletín de minas, industrias y construcciones*, Vol. 5, No. 12 (Lima: 1889), 891; Augusto Tamayo, "Mina de cinabrio "Santa Bárbara" en Huancavelica," in *Boletín del Ministerio de Fomento*, Vol. 2, No. 1 (Lima, 1904), 39; Patiño Paúl Ortíz, 100-01.
- Berry, Edward and Joseph T. Singewald; *The Geology and Paleontology of the Huancavelica Mercury District*; Baltimore: Johns Hopkins Press, 1922.
- Biomonitoring Summary – Mercury; Centers for Disease Control and Prevention; consultado: marzo de 2014
- Cooke, Colin A., Prentiss H. Balcom, Harald Biester, and Alexander P. Wolfe; *Over Three Millennia of Mercury Pollution in the Peruvian Andes*; Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America; Abril 13, 2009
- Elemental Mercury; USEPA TEACH Summary; última revisión: septiembre 21, 2007

- Hagan, Nicole; *Mercury Speciation and Bioaccessibility from Adobe Bricks and Dirt Floors in Huancavelica, Peru*; Poster for 33<sup>rd</sup> Annual SETAC Conference, North America; Noviembre 2012
- Hagan, Nicole; *Mercury Speciation and Bioaccessibility from Adobe Bricks and Dirt Floors in Huancavelica, Peru*; Environmental Geochemistry and Health, agosto 29, 2014
- Hagen, Nicole, Nicholas Robins, H. Hsu-Kim, S. Halabi, R. Dario Espinoza Gonzales, E. Ecos, D. Richter, J. Vandenberg; *Mercury Hair Levels and Factors that Influence Exposure for Residents of Huancavelica, Peru*; Environmental Geochemistry and Health; junio 9, 2014
- Harris, S.G. and Harper, B.L. (2004). Exposure Scenario for CTUIR Traditional Subsistence Lifeways. Department of Science & Engineering, Confederated Tribes of the Umatilla Indian Reservation, P.O. Box 638, Pendleton, OR 97801.
- Harris, S.G. and Harper, B.L.; Exposure Scenario for CTUIR Traditional Subsistence Lifeways; Department of Science & Engineering, Confederated Tribes of the Umatilla Indian Reservation; 2004
- Health Consultation; *Mercury Exposure Investigation Using Serial Urine Testing and Medical Records Review, Kiddie Kollege, Frankline New Jersey*; ATSDR, Junio 13, 2007
- <http://www.atsdr.cdc.gov/hac/PHAManual/appf.html> (Public Health Assessment Guidance Document) – Soil Ingestion for adults – 100 mg/day, and children – 200 mg/day for a 10 Kg child (2014)
- [http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/rb-concentration\\_table/index.htm](http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/rb-concentration_table/index.htm) (USEPA Regional Screening Levels and Site Specific Calculations); consultado: marzo 2014
- Inorganic Mercury; USEPA TEACH Summary; última revisión septiembre 21, 2007
- Kosnett, Michael; *Hair Analysis Panel Discussion, Appendix C*; Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATDSR); Junio 4, 2001
- NRC (National Research Council). 2000. *Toxicological Effects of Methylmercury*. Washington DC: National Academy Press.
- Nuttal, Kern L.; *Interpreting Hair Mercury Levels in Individual Patients*; Association of Clinical Scientists; 2006
- Organic Mercury; USEPA TEACH Summary; última revisión: octubre 29, 2007

- Revis, N.W., T.R. Osborne, G. Holdsworth, and C Hadden; *Mercury in Soil: A Method for Assessing Acceptable Limits*; Archives of Environmental Contamination and Toxicology; 1990
- Robins N. Mercury, mining, and empire; *The human and ecological costs of silver mining in the Andes*; Indiana: Indiana University Press; 2011.r
- Robins, Nicholas A., et al; *Estimations of Historical Atmospheric Mercury Concentrations from Mercury Refining and Present-Day Soil Concentrations of Total Mercury in Huancavelica, Peru*; Science of the Total Environment; marzo 30, 2012.
- Robins, Nicholas and Nicole Hagan; *Mercury production and use in colonial Andean silver production: emissions and health implications*; Environ Health Persp 2012; 120(5):627-631
- Robins, Nicholas, Nicole Hagan, Susan Halabi, Heileen Hsu-Kim, Ruben Dario Espinoza Gonzales, Daniel Richter, and John Vandenberg; *Evaluation of residential exposure to historical mercury contamination in Huancavelica, Peru*; Oral presentation at the International Conference on Mercury as a Global Pollutant, julio 2011.
- Schoof, R. A. and J.B. Nielson; *Evaluation of Methods for Assessing the Oral Bioavailability of Inorganic Mercury in Soil*; 1997
- Tamayo, Augusto. "Mina de cinabrio "Santa Bárbara" en Huancavelica. Boletín del Ministerio de Fomento, Vol. 2, No. 1 (Lima, 1904): 38-43.
- U.S. EPA; *Mercury Study Report to Congress*. U.S. EPA, Washington, DC, EPA-452/R-97-007; 1997. Disponible: <http://www.epa.gov/hg/report.htm>
- USEPA Exposure Factors Handbook, 2011; <http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=20563>
- USEPA; *Trends in Blood Mercury Concentrations and Fish Consumption Among US Women of Child Bearing Age*; NHANES, 1999 to 2010; julio 2013
- Welfringer, B, Zagury, GJ; *Evaluation of two in vitro protocols for determination of mercury bioaccessibility: influence of mercury Hg Concentration (µg/g)*; 2009
- Wise and Féraud, 16.
- WHO; *Air Quality Guidelines for Europe, Second Edition*; Section 6.9 - Mercury; 2000
- WHO; *Fact Sheet - Exposure to Mercury: A Major Public Health Concern*; 2007

- WHO; *Guidance for Identifying Populations at Risk from Mercury Exposure*; World Health Organization; agosto 2008