

Estrategias para la rehabilitación de tierras mineras contaminadas con mercurio para su reutilización en energía renovable y otras estrategias de reutilización autosostenibles.

Producto 1. Un plan de pruebas de campo in situ de técnicas que prometen ser replicables a otros sitios contaminados de manera similar, con base en evaluaciones de tecnología y trabajo de pruebas a escala de laboratorio.

Alfonso Rodríguez, Paul Bardos, Andy Cundy, Euan Hall, Tony Hutchings, Walter Kovalick, Frans de Leij, Rebecca de Leij, Barbara Maco, Ángela Rodríguez.

Marzo, 2017



R3 Environmental Technology Ltd.



C-Cure Solutions



The Land Trust



Prosperity Fund – UK FCO



Derechos de Autor

© Los derechos de autor de este informe pertenecen a r3 Environmental Technology Limitada. Cualquier reproducción o uso no autorizado está estrictamente prohibido.

Descargo de responsabilidades

Los autores, partidarios, financiadores, r3 Environmental Technology Ltd., r3 Environmental Technology Colombia SAS, C-Cure Solutions, y Land Trust no se hacen responsables de ninguna pérdida, independientemente del origen, del uso o confianza en la información contenida en este informe; ni asumen responsabilidad alguna por errores u omisiones. Se aconseja a los lectores que utilicen la información aquí contenida, únicamente como guía y que tomen el asesoramiento profesional apropiado cuando sea necesario.

Pág | ii

Agradecimientos

Este informe es uno de los productos del proyecto del Prosperity Fund en Colombia acerca de *“Estrategias para la rehabilitación de tierras mineras contaminadas con mercurio para su reutilización en energía renovable y otras estrategias de reutilización autosostenibles”*

Este reporte fue preparado por:

Autores	Organización
Alfonso Rodríguez	r3 Environmental Technology Colombia SAS, Colombia
Paul Bardos	r3 Environmental Technology Ltd., Reino Unido
Andy Cundy	Universidad de Southampton / r3 Environmental Technology Ltd., Reino Unido
Euan Hall	The Land Trust, Reino Unido
Tony Hutchings	C-Cure Solutions, Reino Unido
Walter Kovalick	Asociado de r3 en los Estados Unidos de América
Frans de Leij	C-Cure Solutions, Reino Unido
Rebecca de Leij	C-Cure Solutions, Reino Unido
Barbara Maco	Asociada de r3 en los Estados Unidos de América
Ángela Rodríguez	r3 Environmental Technology Colombia SAS, Colombia

Los autores agradecen a todos los socios y colaboradores de este proyecto y, en particular, a las personas de FCO Colombia, el Ministerio de Medio Ambiente de Colombia, el Ministerio de Minería de Colombia, las autoridades ambientales locales y regionales de Colombia que apoyaron el desarrollo del estudio de caso de la BOM y quienes compartieron sus hallazgos y observaciones con este proyecto.

Principales Resultados

- Existe un amplio consenso internacional sobre los valores de exposición peligrosa (y niveles adecuados de seguridad) para el mercurio y otros metales en los suelos y otros medios.
- Las técnicas agronómicas de bajo costo basadas en plantas ya utilizadas en muchos otros países pueden ser adaptadas para reducir los riesgos del mercurio y otros sitios contaminados con metales en Colombia.
- Las opciones de remediación suave, o GRO (por sus siglas en inglés), son métodos eficaces de gestión del riesgo que incluyen:
 - El uso de métodos basados en plantas, hongos y / o bacterias,
 - Enmiendas al suelo que pueden cambiar la especiación de los contaminantes, lixiviables o biodisponibilidad
 - La combinación de métodos basados en plantas, hongos y / o bacterias con enmiendas del suelo.
- Las GRO pueden tener costos de implementación significativamente menores que las tecnologías de remediación convencionales, así como pueden contribuir fuertemente a estrategias de remediación sostenibles.
- En la mayoría de los suelos contaminados y los desechos de la mina, el Hg no se acumula en la biomasa aérea, sino que puede volatilizarse a través de las plantas y conducir a las emisiones de mercurio a la atmósfera. Por lo tanto, el enfoque más efectivo, basado en plantas, para la remediación o manejo de Hg es a través de la estabilización del Hg en el suelo con las enmiendas del suelo y luego establecer un tapón vegetativo de cubierta verde o biomasa, en lugar de extraer el metal.
- En este enfoque se pueden utilizar enmiendas de suelo o suelo con biocarbón ("biochar") para inmovilizar metales pesados (incluyendo Hg) y actuar simultáneamente como acondicionadores del suelo, para reducir la toxicidad del suelo y mejorar el establecimiento y crecimiento de la planta.
- Las pruebas a escala de laboratorio de muestras de suelo de Colombia, que contienen mercurio (y otros metales), tratados con productos de C-Cure, muestran una prometedora reducción de riesgos y restauración de la calidad del suelo. Se eliminó el mercurio soluble en agua y se produjeron grandes reducciones de otros metales en las pocas muestras disponibles en este estudio.
- Se presenta un plan para un proyecto a escala de campo de 18 meses para evaluar los productos de C-Cure y las técnicas de remediación suave asociadas para validar los estudios de laboratorio y evaluar la viabilidad de un esfuerzo a mayor escala, así como evaluar la rentabilidad y los beneficios relacionados para una gama más amplia de Sitios en Colombia

Resumen Ejecutivo

Colombia está dotada de abundantes minerales, metales y combustibles fósiles. El aumento de la extracción de recursos naturales como el oro, está impulsando el crecimiento económico, al mismo tiempo que causa la contaminación del suelo y el agua, la degradación de los ecosistemas sensibles y el aumento de los riesgos para la salud humana. Desde el año 2000, el área cubierta por títulos mineros aumentó de 1 millón de hectáreas a 8,5 millones de hectáreas (alrededor del 8% de la superficie terrestre). La minería artesanal representa el 70% del oro extraído en Colombia, y proporciona un medio de vida a cerca de 200 000 personas en condiciones de pobreza. (OCDE, 2014). Un estudio reciente llevado a cabo por el Ministerio para el Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) encontró cerca de 1.843 lugares potencialmente considerados campos contaminados o sitios contaminados para todos los sectores económicos.

Pág | iv

En respuesta a esta situación, el Fondo de Prosperidad del Reino Unido encargó un proyecto sobre estrategias para la rehabilitación de tierras mineras contaminadas con mercurio (áreas contaminadas) para energía renovable y otras reutilizaciones autosostenibles. Este documento es uno de los varios resultados de este proyecto, específicamente sobre enfoques, factibilidad y un plan de implementación sobre el terreno para rehabilitar las tierras afectadas por la contaminación del mercurio del suelo con el fin de que estas tierras vuelvan a ser productivas, centrándose en oportunidades de energía renovable y/o los servicios más adecuados. Este plan de pruebas de campo in situ, que sugiere técnicas potencialmente replicables en otros sitios contaminados de manera similar, se basa en los resultados de un estudio de escritorio y pruebas a escala de bancos de las muestras de suelo de los dos sitios seleccionados en el proyecto.

La sección 2 de este documento provee una visión general de las opciones de bajo impacto de “remediación suave” para el mercurio y otros metales, basada en los resultados de la investigación internacional y las mejores prácticas. Las opciones de remediación suave, o GRO (por sus siglas en inglés), se definen como estrategias o tecnologías de gestión de riesgos que resultan en una ganancia neta (o al menos, no resultan en una reducción bruta) en las funciones del suelo, así como se logra la gestión de los riesgos. Las GRO abarcan muchas tecnologías, incluyendo el uso de plantas (fito), hongos (mico) y/o métodos basados en bacterias, con o sin aditivos químicos o enmiendas del suelo. Pueden aplicarse para reducir la transferencia de contaminantes a receptores locales mediante la estabilización in situ o la extracción, transformación o degradación de contaminantes.

Varios estudios a nivel internacional han demostrado el potencial de las GRO para proporcionar una gestión rápida del riesgo, ejerciendo control de la vía de exposición mediante la contención y la estabilización, junto con una remoción a largo plazo o la inmovilización/aislamiento de contaminantes. A medida que los suelos tratados permanecen sin sellar (sin pavimentos o construcciones sobre ellos), las GRO son altamente aplicables a sitios destinados a usos blandos, por ejemplo, para parques urbanos o comunitarios, implementación de energías renovables, producción de biomasa, etc. Dependiendo de la situación específica del sitio, las GRO pueden tener costes de despliegue significativamente más bajos que las tecnologías de remediación convencionales y contribuir a estrategias de remediación sostenibles, proporcionando una amplia gama de beneficios económicos, sociales y ambientales más amplios.

Un enfoque especial de este proyecto, fue la evaluación de biocarbón como una enmienda del suelo -dado su potencial especial para el tratamiento con mercurio-. El biocarbón y el carbón activado muestran un buen potencial para la adsorción y estabilización del Hg. Un socio de este proyecto, C-Cure Solutions, ha desarrollado productos patentados de biocarbón que podrían aplicarse potencialmente a los sitios contaminados con mercurio, como se discute en la Sección 4.

En la Sección 3 se presenta información de antecedentes relacionados con dos sitios mineros en Colombia, de los cuales se tomaron muestras para evaluar la naturaleza y extensión de la contaminación por mercurio (y otros metales) en sitios contaminados típicos. Estas muestras se sometieron a continuación, a ensayos a escala de laboratorio del innovador producto de estabilización de mercurio -biocarbón- mencionado anteriormente. Esta sección, enmarca el contexto ambiental y los riesgos asociados a los dos sitios mineros: Segovia en el departamento de Antioquia y Tadó en Chocó. Estos municipios fueron seleccionados en común acuerdo con los Ministerios de Minas y Energía y el de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, dado su historial de minería artesanal y el uso asociado de mercurio. Se tomaron muestras de las zonas donde actualmente se extrae oro o se había dado este uso en el pasado (sitios abandonados). Junto con la orientación de los líderes comunitarios de las dos áreas, la identificación de puntos de muestreo específicos en Segovia se realizó en concierto con personal del gobierno municipal, que forma parte de la Dirección de Agricultura, Minas y Medio Ambiente y en Tadó, se identificó un área de minería de oro abandonada hace aproximadamente 8 años.

En la sección 4 se describen los ensayos a escala de laboratorio y análisis utilizados para cuantificar el mercurio y otros contaminantes metálicos en las muestras de suelo colombianas, así como los diferentes regímenes de tratamiento aplicados a las muestras utilizando biocarbón desarrollado por el socio del proyecto C-Cure Solutions. El éxito de las diversas opciones de tratamiento se describe en el contexto de las normas internacionalmente aceptadas para el mercurio (y otros metales) para varios escenarios de exposición.

Como base para la evaluación de los niveles aceptables de concentraciones de metales en el suelo contaminado, esta sección describe varias normas internacionales de calidad ambiental. Estas incluyen los Valores Guía para el suelo (SGV), los Criterios de Aceptación de Residuos (WAC) y la Directiva Marco de Agua de la Unión Europea (EU WFD). Los SGV están diseñados para ayudar a los profesionales a evaluar el riesgo a largo plazo para la salud debido a la exposición humana a la contaminación química en el suelo. Los WAC se aseguran de que los residuos potencialmente peligrosos se eliminen de manera segura para que ya no representen un riesgo para los seres humanos y el medio ambiente. A diferencia de los SGV, los WAC evalúan los riesgos que los materiales contaminados representan para el medio ambiente y los receptores humanos basados en concentraciones lixiviables de contaminantes. Por último, la EU WFD 2000/60/CE fue elaborada para proteger las aguas superficiales de la contaminación. Cada uno de estos estándares de referencia representan un valioso pilar para evaluar la eficacia de los enfoques de remediación para los metales.

Las tecnologías licenciadas a C-Cure están diseñadas para inmovilizar contaminantes de metales pesados, adsorbiéndolos. Una vez adsorbidos en los productos C-Cure, los contaminantes ya no son lixiviables y no interfieren con los procesos biológicos (desintoxicación). Dependiendo de las condiciones del suelo, la adsorción de la mayoría de los metales pesados sobre los productos C-Cure es irreversible y estable. Además, la

desintoxicación del suelo conduce a la restauración de la función normal del suelo y permite la revegetación.

Las muestras *in situ* tomadas en Colombia fueron evaluadas para concentraciones totales de metales y concentraciones de metal lixiviable, usando procedimientos estándar. Posteriormente, se extrajeron muestras que contenían las concentraciones más elevadas de mercurio usando un procedimiento de extracción secuencial para determinar si el mercurio era (a) soluble en agua, (b) soluble en ácido estomacal (c) unido a materia orgánica, (d) en forma elemental O (e) presente como sulfuro de mercurio. Cada una de estas extracciones puede relacionarse directamente con rutas de exposición importantes del mercurio.

Pág | vi

La muestra que presentó los más altos niveles de concentración de mercurio total y mercurio lixiviable fue elegida de entre las ocho muestras para probar el tratamiento con el producto de tratamiento de C-Cure-CCA. El uso una tasa de enmienda del 5% (peso en húmedo) dio como resultado que tanto el mercurio hidrosoluble como el soluble en ácido estomacal se estabilizó en el suelo. Para ocho metales adicionales, las tasas de enmienda del producto C-Cure que oscilaba entre el 2,3% y el 8,4% tuvieron éxito en la reducción de las concentraciones a valores clasificados como inertes de acuerdo con los criterios UK WAC.

En la Sección 5 se describe un proyecto de plan de pruebas de campo en sitio de 18 meses para remediación de sitios contaminados con metales para validar las tecnologías, comprender el costo y considerar la implementación, desarrollo de negocios y otros temas de ampliación. Los resultados preliminares sugieren que la técnica de remediación de C-Cure es muy eficaz para reducir la lixiviación y biodisponibilidad de metales pesados y mercurio en los desechos contaminados de minas. Se requeriría más trabajo para probar y demostrar la técnica a una escala comercialmente relevante. El plan se compone de varias etapas que comienzan con un mapeo detallado de los niveles de contaminantes en cinco yacimientos mineros abandonados y en seis desechos de procesos frescos o actuales de minas. En seguida se llevarán a cabo muestreos y análisis dirigidos a determinar la cantidad lixiviable y biodisponible de los contaminantes metálicos, seguido por una optimización en laboratorio de la tasa de enmienda requerida de los productos de C-Cure. Esta información se utilizará junto con otros datos del sitio para formar un modelo conceptual de exposición potencial y riesgo para los receptores humanos, ganaderos y ecológicos. Este material será presentado y revisado con las partes interesadas del sitio para establecer los "criterios de éxito" del sitio para la actividad de remediación a escala de campo. La propuesta de consenso se utilizaría para seleccionar áreas de ensayo, establecer y monitorear parcelas de campo y demostrar y evaluar la eficacia, costo-efectividad, beneficios y otros aspectos de la remediación de la contaminación de metales usando estos enfoques innovadores.

Principales conclusiones y recomendaciones

Las GRO ofrecen oportunidades significativas para mitigar los riesgos del mercurio. El complicado comportamiento de especiación del Mercury indica que es uno de los elementos tóxicos más difíciles de tratar, por lo que algunos GRO como la fito-extracción pueden no ser apropiados. Sin embargo, la inmovilización *in situ* es prometedora, en particular para proteger los recursos hídricos de la lixiviación del suelo. El trabajo inicial de la prueba utilizando los biocarbones de C-CURE ha proporcionado una prueba de concepto preliminar. Sin embargo, esto debe ser mejor validado por un programa de estudios de campo. Parece probable que la inmovilización *in situ* será mejorada por la revegetación como un complemento para proporcionar la estabilidad del suelo y el mantenimiento del pH y las condiciones redox. La

cubierta vegetal también debe diseñarse con minimización de la exposición humana, por ejemplo, el uso de cultivos no alimenticios, como por ejemplo energía o fibra, o para otros fines como el hábitat o el equipamiento.

Proporcionar una mitigación estable del riesgo facilitará la reutilización de la tierra afectada y la producción de energía renovable podría ser una importante oportunidad de reutilización, por ejemplo, en conjunción con proyectos locales de abastecimiento y de empresas comunitarias. Una serie de estudios iniciales de viabilidad de la energía renovable llevados a cabo han confirmado el potencial de enfoques como la energía solar (fotovoltaica). Pág | vii

La recomendación de este informe es que el trabajo de pruebas de despliegue sobre el terreno debe iniciarse con carácter urgente, dado el potencial que tiene la GRO para la mitigación del problema del mercurio en Colombia.

Tabla de Contenido

1.	Introducción.....	1
1.1	Descripción general del proyecto.....	1
1.2	Alcance del informe del Producto 1	2
2.	Panorama de las opciones de “remediación gentil” de bajo insumo para el mercurio	3
2.1	Concepto de la remediación gentil / suave	3
2.2	Técnicas de remediación de bajo insumo.....	5
2.2.1	<i>Fito-tecnologías.....</i>	<i>5</i>
2.2.2	<i>Biocarbón y carbón activado</i>	<i>5</i>
3.	Descripción de los Sitios Mineros de Colombia y las Muestras Evaluadas en Estudios de Laboratorio	7
3.1	Selección de los Sitios.....	7
3.1.1	<i>Descripción del Sitio 1: Segovia, Antioquia.....</i>	<i>7</i>
3.1.2	<i>Descripción del Sitio 2: Tadó, Chocó.....</i>	<i>9</i>
3.2	Muestreo	11
3.2.1	<i>Segovia, Antioquia</i>	<i>11</i>
3.2.2	<i>Tadó, Chocó.....</i>	<i>11</i>
4.	Evaluación a Escala de Laboratorio de los Carbones de C-Cure para el Tratamiento del Mercurio en los Suelos Impactados	12
4.1	La Tecnología de C-Cure	12
4.2	Objetivos	12
4.3	Estándares de calidad ambiental para el mercurio y otros metales pesados	13
4.4	Muestras y análisis de muestras	14
4.5	Contaminación de mercurio.....	14
4.6	Tratamiento de la Contaminación de Mercurio usando productos de C-Cure	14
4.7	Contaminación de Metales Pesados	16
4.8	Tratamiento de Contaminación de Metales Pesados usando productos de C-Cure ..	17
5.	Plan Propuesto de Pruebas In-Situ de Remediación Suave y Energías Renovables en Colombia.....	20
5.1	Pruebas in-situ de (bio)carbones modificados	20
5.1.1	<i>Duración del Proyecto</i>	<i>20</i>
5.1.2	<i>Objetivos e Introducción</i>	<i>20</i>
5.1.3	<i>Productos del Proyecto</i>	<i>20</i>
5.1.4	<i>Estimaciones de costos del programa propuesto de pruebas in situ:.....</i>	<i>23</i>
5.2	Planificación del Despliegue de Energía Renovable.....	24
6.	Conclusiones y recomendaciones	26
7.	Referencias	28

Lista de Figuras

Figura 1. Ejemplo de estrategia de gestión de riesgos asada en GROS, adaptada a lo largo de los vínculos de contaminación. (Cundy, et al., 2015).....	5
Figura 2. Ubicación del Municipio de Segovia a nivel nacional y departamental. Fuente: Ecodes Ingeniería, 2016.	8
Figura 3. Sector Principal de la economía. Fuente: r3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.....	8
Figura 4. Localización de San José de Tadó (Tadó). Fuente: R3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.....	9
Figura 5. Gente del común tratando de extraer oro en sitios abandonados. Fuente: R3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.	10
Figura 6. Distribución de puntos de muestreo. Zona rural de Tadó. Fuente: r3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.....	11
Figura 7. Cantidades de mercurio soluble en agua (a) y soluble en ácido estomacal (b), en suelos tomados del sitio de muestreo S4 en la muestra de control y muestras tratadas con 5% (masa/masa) del producto de C-Cure (CCA). N=2.....	15
Figura 8. Concentraciones ($\mu\text{g/kg}$) de mercurio hidrosoluble, en la muestra S4 enmendada con cantidades crecientes (0, 0.5, 1, 2, 3 y 5% m/m) del producto de C-Cure (CCA). N=2. 16	16
Figura 9. Concentraciones ($\mu\text{g/kg}$) de mercurio soluble en ácido estomacal, en la muestra S4 enmendada con cantidades crecientes (0, 0.5, 1, 2, 3 y 5% m/m) del producto de C-Cure (CCA). N=2.	16
Figura 10. Ubicación del Municipio de Segovia a nivel nacional y departamental. Fuente: Ecodes Ingeniería, 2016.	2
Figura 11. Carretera terciaria de acceso entre zonas urbanas y rurales. Fuente: r3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.	3
Figura 12. Sector principal de la economía. Fuente: r3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.....	3
Figura 13. Piscina con agua de lixiviado de cianuro o mercurio. Fuente: r3 Environmental technology Colombia SAS, 2016.....	4
Figura 14. Pirámide de población por rangos de edad y sexo. Fuente: (DNP, 2015).	5
Figura 15. Paisaje de Segovia, Antioquia. Fuente: r3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.....	8
Figura 16. Mina subterránea y planta de beneficio involucrada en el proceso de extracción de oro en Segovia, Antioquia. Fuente: r3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.....	9
Figura 17. Distribución de puntos de muestreo en el área urbana de Segovia, Antioquia. Fuente: Ecodes Ingeniería S.A.S, 2016.	11
Figura 18. Localización de San José de Tadó (Tadó). Fuente: R3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.....	14

Figura 19. Acceso principal por carretera a Tadó. Fuente: R3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.....	14
Figura 20. Zona comercial de Tadó. Fuente: R3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.....	15
Figura 21. Río San Juan. Tadó. Fuente: R3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.	16
Figura 22. Distribución de la población de Tadó según edad y sexo. Fuente: (DANE, 2005)	16
Figura 23. Paisaje de Tadó. Fuente: R3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.	18
Figura 24. La gente del común tratando de extraer oro en sitios abandonados. Fuente: R3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.	20
Figura 25. Distribución de puntos de muestreo. Zona rural de Tadó. Fuente: R3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.....	21
Figura 26. Formas mediante las cuales el mercurio puede estar presente en el medio ambiente y su riesgo asociado para los seres humanos y la vida silvestre	27
Figura 27. Ejemplo de muestra (S3) en Mina El Planchón. La muestra S3 se tomó aguas abajo de la planta de procesamiento de oro, muy cerca de las casas vecinas de la ciudad.....	32
Figura 28. Concentraciones totales de mercurio (mg Hg / kg) en muestras tomadas de una zona minera activa (Muestras S1-S6) y una zona minera abandonada (Muestras T1-T6). Línea roja representa SGV para uso comercial y de adjudicación, la línea color ámbar representa SGV para Residencial	34
Figura 29. Concentraciones lixiviables de mercurio (mg Hg / kg) en muestras tomadas de un área minera activa (Muestras S1-S6) y una zona minera abandonada (Muestras T1-T6). La línea verde representa concentraciones de mercurio lixiviable por debajo de las cuales el suelo se clasificaría como "residuos inertes"; La línea ámbar representa la concentración por encima de la cual el suelo se clasificaría como "peligroso"	36
Figura 30. Cantidad de mercurio hidrosoluble (a) y soluble en ácido estomacal humano (b), en suelo tomado de la muestra S4 en la muestra control y las muestras tratadas con 5% (m/m) del producto C-Cure (CCA). N=2.	40
Figura 31. Concentraciones (μg / kg) de mercurio soluble en agua en el suelo extraído del sitio de muestreo S4 modificado con cantidades crecientes (0, 0,5, 1, 2, 3 y 5% m/m) de producto C-Cure (CCA). N = 2.	40
Figura 32. Concentraciones (μg / kg) de mercurio soluble en ácido estomacal, en suelo tomado del sitio de muestreo S4 modificado con cantidades crecientes (0, 0,5, 1, 2, 3 y 5% m/m) de producto C-Cure (CCA). N = 2.	41
Figura 33. Concentraciones de aluminio lixiviable (μg / kg) en el suelo extraído del sitio S3 antes y después del tratamiento con producto adsorbente de metal C-Cure (C-Cure-TTLX) de 2,3, 4,4, 6,7 o 8,9% (m/m). N = 2. La línea roja representa la media anual de EQS para las aguas superficiales de la UE.....	41
Figura 34. Concentraciones de níquel lixiviable (μg / kg) en el suelo extraído del sitio S3 antes y después del tratamiento con 2,3, 4,4, 6,7 o 8,9% (m/m) de producto de adsorción de metal	

C-Cure (TTLX). N = 2. La línea roja representa la media anual de EQS para las aguas superficiales de la UE. 42

Figura 35. Concentraciones de cobre lixiviable ($\mu\text{g} / \text{kg}$) en el suelo extraído del sitio S3 antes y después del tratamiento con 2,3, 4,4, 6,7 o 8,9% (m/m) de producto de adsorción de metal C-Cure (TTLX). N = 2. La línea roja representa las EQS medias anuales para las aguas superficiales de la UE; La línea verde clara es la concentración de aceptación de residuos para residuos inertes y la línea púrpura es la concentración de aceptación de residuos para residuos peligrosos no reactivos estables. 42

Figura 36. Concentraciones de hierro lixiviable ($\mu\text{g} / \text{kg}$) en el suelo extraído del sitio S3 antes y después del tratamiento con 2,3, 4,4, 6,7 o 8,9% (m/m) de producto de adsorción de metal C-Cure (TTLX). N = 2. La línea roja representa el promedio anual de EQS para las aguas superficiales de la UE. 43

Figura 37. Concentraciones de plomo lixiviable ($\mu\text{g} / \text{kg}$) en el suelo extraído del sitio S3 antes y después del tratamiento con 2,3, 4,4, 6,7 o 8,9% (m/m) de producto de adsorción de metal C-Cure (TTLX). N = 2. La línea roja representa los promedios anuales de EQS para las aguas superficiales de la UE; La línea verde clara es la concentración de aceptación de desechos para residuos inertes y la línea púrpura es la concentración de aceptación de desechos para residuos peligrosos no reactivos estables y la línea roja gruesa representa la WAC para residuos peligrosos. 44

Figura 38. Concentraciones de estaño lixiviable ($\mu\text{g} / \text{kg}$) en el suelo extraído del sitio S3 antes y después del tratamiento con producto de adsorción de metal C-Cure (TTLX) de 2,3, 4,4, 6,7 o 8,9% (m/m). N = 2. La línea roja representa el promedio anual de EQS para las aguas superficiales de la UE. 44

Figura 39. Concentraciones de zinc lixiviable ($\mu\text{g} / \text{kg}$) en el suelo extraído del sitio S3 antes y después del tratamiento con 2,3, 4,4, 6,7 o 8,9% (m/m) de producto de adsorción de metal C-Cure (TTLX). N = 2. La línea roja representa los promedios anuales de EQS para las aguas superficiales de la UE; La línea verde clara es la concentración de aceptación de desechos para residuos inertes y la línea ámbar es la concentración de aceptación de desechos peligrosos no reactivos estables y la línea roja gruesa representa la WAC para residuos peligrosos. 45

Figura 40. Concentraciones de cadmio lixiviable ($\mu\text{g} / \text{kg}$) en el suelo tomado del sitio S3 antes y después del tratamiento con 2,3, 4,4, 6,7 o 8,9% (m/m) de producto de adsorción de metal C-Cure (TTLX). N = 2. La línea roja representa los promedios anuales de EQS para las aguas superficiales de la UE; La línea verde claro es la concentración de aceptación de desechos para residuos inertes y la línea gris es la concentración de aceptación de desechos peligrosos no reactivos estables y la línea roja gruesa representa la WAC para residuos peligrosos. . 45

Figura 41. Concentraciones de cromo lixiviable ($\mu\text{g} / \text{kg}$) en el suelo extraído del sitio S3 antes y después del tratamiento con 2,3,4,4,7,7 o 8,9% (m/m) de producto de adsorción de metal C-Cure (TTLX). N = 2. La línea roja representa los promedios anuales de EQS para las aguas superficiales de la UE; La línea verde claro es la concentración de aceptación de desechos para residuos inertes y la línea gris es la concentración de aceptación de desechos peligrosos no reactivos estables y la línea roja gruesa representa la WAC para residuos peligrosos. . 46

Figura 42. Concentraciones de arsénico lixiviable ($\mu\text{g} / \text{kg}$) en el suelo extraído del sitio S3 antes y después del tratamiento con 2,3, 4,4, 6,7 o 8,9% (m/m) de producto de adsorción de

metal C-Cure (TTLX). N = 2. La línea roja representa los promedios anuales de EQS para las aguas superficiales de la UE..... 47

Lista de Tablas

Tabla 1. Ejemplos de Opciones de Remediación Gentil usados para remediar suelos contaminados, sea por metales/metaloideos o contaminación mezclada (Fuente: (Cundy, et al., 2016)).....	4
Tabla 2. Porcentajes de reducción en las concentraciones de metal lixiviable después del tratamiento con diferentes cantidades de producto de adsorción de metal de C-Cure.	17
Tabla 3. Resumen de concentraciones de metales en muestras tratadas y no tratadas y clasificación de peligros antes y después del tratamiento con diferentes cantidades de producto adsorbente de metales de C-Cure. A menos que se especifique de otra manera, las clasificaciones de peligros se basan en los WAC, donde el verde representa el residuo inerte, el color amarillo representa el residuo peligroso no reactivo estable, el color ámbar representa el residuo peligroso y el rojo representa un residuo demasiado tóxico para ser aceptado en un relleno de residuos peligrosos.....	19
Tabla 4. Red de drenaje superficial en el municipio de Segovia. Adaptado de: (Alcaldía de Segovia, 2008).....	8
Tabla 5. Información detallada de los puntos de muestreo del municipio de Segovia, Antioquia. Fuente: R3 Environmental Technology Colombia S.A.S, 2016.....	12
Tabla 6. Factores meteorológicos característicos del clima en Tadó, Choco. Fuente: Adaptado de (Palacios Murillo & Rengifo Arias, 2014)	18
Tabla 7. Especies conocidas en Tadó. Fuente: Adaptado de (Palacios Perea, EOT Tadó, 2000)	19
Tabla 8. Información detallada de los puntos de muestreo. Fuente: R3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.....	22
Tabla 9. Valores Guía del Suelo del Reino Unido para 7 diferentes metales pesados. Tenga en cuenta que los valores de SGV se basan en los valores CLEA 2009 (Contaminated Land Exposure Assessment), que son documentos técnicos actualizados emitidos por la agencia Ambiental. Sustituyen los valores CLEA2002 e ICRCL (Comité Interdepartamental para la Reurbanización/redesarrollo de Tierras Contaminadas) para la evaluación del riesgo para la salud humana derivado de la contaminación de la tierra. Para el plomo (Pb) y el cromo (Cr) no se publicaron actualizaciones en 2009 por lo que las pautas mostradas son de CLEA 2002.	28
Tabla 10. Concentraciones máximas de metales pesados en suelos agrícolas que difieren en la acidez según la Directiva EC 86/278/EEC y después de la aplicación de lodos residuales.	29
Tabla 11. Criterios de aceptación de residuos del Reino Unido (WAC) para las concentraciones máximas de contaminantes dentro de los residuos sólidos basándose en los resultados de las pruebas de lixiviación a base de agua (mg / kg) derivadas de una extracción líquida a sólida (L / S = 10).	30

Tabla 12. Directiva marco del agua EQS de metales pesados en aguas superficiales. Los números representan concentraciones medias anuales, a menos que se denoten como MAC, que representan la concentración máxima anual de un metal en particular.	31
Tabla 13. Concentraciones totales (mg / kg) de metales pesados (excepto Hg) en muestras tomadas de una zona minera activa (muestras S1-S6) y una zona minera abandonada (muestras T1-T6) en Segovia. Las EQS se basan en los Valores de la Guía de Suelos del Reino Unido;	35
Tabla 14. Concentraciones lixiviables (µg / kg) de metales pesados (excepto Hg) en muestras tomadas de una zona minera activa (muestras S1-S6) y una zona minera abandonada (muestras T1 a T6)	36
Tabla 15. Tratamiento de la muestra de suelo 4S	38
Tabla 16. Resumen de concentraciones de metales en muestras tratadas y no tratadas y clasificación de peligros antes y después del tratamiento con diferentes cantidades de producto adsorbente metálico C-Cure. A menos que se especifique de otra manera, las clasificaciones de peligros se basan en WAC, donde el verde representa el residuo inerte, el color amarillo representa el residuo peligroso no reactivo estable, el color ámbar representa el residuo peligroso y el rojo representa un residuo demasiado tóxico para ser aceptado en un vertedero peligroso sitio.	47

Lista de Anexos

Anexo 1: Descripción detallada de los sitios mineros de Colombia y muestras relacionadas evaluadas en estudios de laboratorio

Descripción del Sitio 1: Segovia, Antioquia

Estrategia de Muestreo Sitio 1

Descripción Sitio 2: Tadó, Choco

Estrategia de Muestreo en el Sitio 2

Anexo 2: Detalles de pruebas de lixiviación y resultados

Objetivos

Toxicidad del Mercurio

Comportamiento del Mercurio en el Ambiente

Estándares de calidad ambiental para el mercurio y otros metales pesados

Evaluación de mercurio y otros metales pesados en las muestras de suelo

Resultados

Métodos utilizados para el tratamiento de la contaminación por metales

Resultados del Tratamiento de C-Cure para la Contaminación por Metales

Tratamiento de la contaminación por metales pesados

1. Introducción

1.1 Descripción general del proyecto

El proyecto del Fondo de Prosperidad de la Oficina de Relaciones Exteriores y de la Mancomunidad de Naciones (FCO) del Reino Unido en Colombia sobre Estrategias para la rehabilitación de tierras mineras contaminadas con mercurio para uso en energías renovables y otras estrategias de reutilización autosostenibles, operó a partir de mediados de 2016 hasta principios de 2017. Su propósito fue facilitar el cambio, proporcionando una gama de recursos científicos con el fin de rehabilitar las tierras afectadas por la contaminación del mercurio del suelo en las zonas desfavorecidas de Colombia; a la vez que convierte esta tierra en útil para un uso productivo, centrándose en las oportunidades de energía renovable y / o en otros servicios. El proyecto apoya los objetivos de la FCO respecto a aumentar la estabilidad regional, facilitar el crecimiento económico sostenible, aprovechar la innovación en particular para el desarrollo con bajas emisiones de carbono, apoyar la adhesión a la OCDE e identificar las posibilidades de nuevas empresas comunitarias (EA 2010).

Los dos recursos o activos más vitales de Colombia -el capital social y natural- están en riesgo crónico después de medio siglo de conflicto. La minería de oro, que utiliza técnicas de recuperación inseguras, ha resultado en impactos ambientales y de salud severos, principalmente por el uso de mercurio en quizás más de 7,000 localidades. Este proyecto considera tanto la mitigación del riesgo como las oportunidades de las empresas comunitarias para las tierras rehabilitadas.

El Reino Unido está a la vanguardia de la investigación y la inversión práctica en la remediación sostenible, el compromiso de la comunidad en la regeneración y la reutilización de los campos contaminados¹ para energías renovables, mejora de servicios y comodidades y el ocio. Este enfoque integrado ofrece beneficios positivos para la salud y el medio ambiente y el crecimiento económico sostenible, incluyendo oportunidades de negocios comerciales y comunitarios en Colombia, beneficios para los socios del Reino Unido para futuros negocios e influencia y posibilidades de adaptación al cambio climático y resiliencia.

El proyecto adaptó los razonamientos de la EPA de los Estados Unidos, el Reino Unido y la UE sobre la rehabilitación de campos abandonados para la energía renovable y otras reutilizaciones suaves o de bajo impacto para estas áreas de minería de oro afectadas por la contaminación por mercurio. Combinó la investigación a nivel estructural y político con las investigaciones específicas del sitio (en ubicaciones identificadas en conjunto con los Ministerios Ambientales y Mineros de Colombia) para sugerir directrices de alto nivel y orientación general, diseño y apoyo a la decisión y propuestas de desarrollo en uno o más sitios. Evaluó y adaptó estrategias innovadoras de bajo impacto para el manejo de la tierra, la remediación sostenible y el desarrollo de empresas comerciales o comunitarias (particularmente para energías renovables) para estas áreas afectadas por la minería aurífera

¹ En este contexto, un área contaminada describe terrenos degradados o usados anteriormente que no están siendo reconstruidos o re-desarrollados, por ejemplo, un antiguo sitio de eliminación de desechos o una antigua zona urbana.

artesanal, conectando la ciencia y la base técnica para la política en Colombia con el estado del arte internacional.

El enfoque sobre el mercurio se vincula directamente con las actuales preocupaciones de Colombia bajo el Convenio de Minamata, al que se unió en 2013. Además de los estudios de factibilidad sobre la producción de energía renovable en tierras mineras, el proyecto llevó a cabo pruebas a escala de laboratorio de técnicas de inmovilización de mercurio en muestras de dos locaciones en Colombia: Segovia en Antioquia y Tadó en Chocó. Estas dos áreas tienen una historia de minería de oro artesanal con su contaminación ambiental asociada (incluyendo mercurio) e impactos sociales, y fueron seleccionadas en consulta con los Ministerios de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible y el de Energía y Minas de Colombia.

Pág | 2

El proyecto proporcionó tres resultados principales de dominio público:

1. << Plan de pruebas de campo in situ de técnicas que prometen ser replicables a otros sitios contaminados de manera similar, con base en evaluaciones de tecnología y trabajo de pruebas a escala de laboratorio.>> [*Un plan para pruebas de campo in-situ de técnicas que prometen ser replicables a otros sitios contaminados de manera similar, basados en evaluaciones de tecnología y trabajo de prueba a escala de laboratorio.*]
2. << Estrategias para la rehabilitación de tierras mineras contaminadas con mercurio para energías renovables y otras estrategias de reutilización autosostenibles>> [*Orientación y estrategias para la reutilización de tierras mineras contaminadas, mediante la transferencia de conocimientos de última generación y de enfoques de implementación exitosos del Reino Unido, la UE y América del Norte, adaptándolos a la situación local en Colombia.*]
3. << Informe de política para los gobiernos regionales y nacionales en Colombia >> [*Un informe de política para los gobiernos regionales y nacionales en Colombia. En el documento se describen las estrategias para tratar los yacimientos mineros contaminados y se abordan los compromisos políticos contenidos en la Ley 1658 de 2013, el compromiso de Colombia con el Convenio Minamata de las Naciones Unidas (el Plan Único de Mercurio), el Acuerdo Climático de París 2015 y la adhesión colombiana a la OCDE.*]

1.2 Alcance del informe del Producto 1

El propósito del Producto 1 fue desarrollar el diseño de un plan de pruebas de campo in-situ para técnicas que prometen ser replicables a otros sitios contaminados de forma similar. Este diseño se basa en los resultados del estudio de escritorio y de las pruebas a escala de laboratorio de las muestras de suelo de los dos sitios seleccionados en el proyecto.

2. Panorama de las opciones de “remediación gentil” de bajo insumo para el mercurio

2.1 Concepto de la remediación gentil / suave

Pág | 3

Las opciones de remediación suave, o GRO (por sus siglas en inglés), se definen como estrategias o tecnologías de gestión de riesgos que resultan en una ganancia neta (o al menos sin una pérdida bruta) en la función del suelo, así como en lograr la gestión de riesgos (Cundy et al., 2013). Las GRO abarcan muchas tecnologías, incluyendo el uso de métodos basados en plantas (fito), hongos (mico-) y / o bacterias, con o sin aditivos químicos o enmiendas del suelo, que pueden aplicarse para reducir la transferencia de contaminantes a receptores locales mediante estabilización in-situ (utilizando procesos biológicos y / o químicos), o extracción, transformación o degradación de contaminantes. Estas opciones suaves de remediación pueden desplegarse, específicamente aquellas que usan plantas y sus sistemas microbianos asociados, para eliminar la piscina lábil (o biodisponible) de contaminantes inorgánicos de un sitio (fito-extracción), eliminar o degradar contaminantes orgánicos (por ejemplo, fito-degradación), proteger el agua (Por ejemplo, rizo-filtración), o estabilizar o inmovilizar contaminantes en la sub-superficie (por ejemplo, fito-estabilización, inmovilización in situ / fito-exclusión). Estos enfoques se resumen en la Tabla 1. De éstos, la fito-extracción es quizás la más conocida, particularmente para los contaminantes de metales pesados. Varios estudios a nivel internacional han demostrado el potencial de las GRO para proporcionar una gestión rápida del riesgo a través del control de la vía de exposición, mediante la contención y la estabilización, junto con una remoción o inmovilización / aislamiento a largo plazo de contaminantes, utilizando un enfoque que puede adaptarse a lo largo de los enlaces contaminantes (Figura 1). Notablemente, a medida que los suelos tratados permanecen sin sellar, las GRO son altamente aplicables a sitios a los que se les dará usos suaves, tales como parques urbanos o comunitarios, implementación de energías renovables, generación de biomasa, etc. (Cundy et al., 2016). Dependiendo de la situación específica del sitio, los GROs pueden tener costos de implementación significativamente menores que las tecnologías de remediación convencionales y pueden contribuir fuertemente a estrategias de remediación sostenibles, proporcionando una amplia gama de beneficios económicos, sociales y ambientales más amplios (por ejemplo, generación de biomasa, secuestro de carbono, filtración de agua y manejo del drenaje, restauración de comunidades vegetales, microbianas y animales (Vangronsveld *et al.* 1995, 2009; Witters *et al.* 2012; Cundy, *et al.*, 2013; Cundy, *et al.*, 2015). Estos beneficios potenciales y las herramientas de apoyo a la toma de decisiones que ayudan a su identificación y cuantificación se han resumido en los resultados de los proyectos de Groenlandia y HOMBRE de la UE (www.greenland-project.eu, www.zerobrownfields.eu), en particular la Matriz de oportunidades de sitios contaminados (BOM) resultante del proyecto HOMBRE, discutido más adelante en el Informe del Productos 2²).

² Orientación y Estrategias para la Reutilización de la Tierra mediante la Transferencia del Conocimiento del Estado del Arte. www.r3environmental.com.co/descargas

Tabla 1. Ejemplos de Opciones de Remediación Gentil usados para remediar suelos contaminados, sea por metales/metaloideos o contaminación mezclada (Fuente: (Cundy, et al., 2016)).

GRO	Descripción
Fito-extracción	La remoción de metal (lroides) u orgánicos de los suelos a través de la acumulación en la biomasa cosechable de las plantas. Cuando se ayuda mediante el uso de enmiendas de suelo (por ejemplo, EDTA u otros agentes movilizantes de metales), esto se denomina "fito-extracción asistida".
Fito-degradación / fito-transformación	El uso de plantas (y microorganismos asociados tales como la rizósfera y las bacterias endofíticas) para captar, almacenar y degradar los contaminantes orgánicos.
Rizo-degradación	El uso de raíces de plantas y microorganismos de rizósfera para degradar los contaminantes orgánicos.
Rizo-filtración	La remoción de metal (lroides) u orgánicos de fuentes acuosas (incluyendo agua subterránea) por las raíces de las plantas y los microorganismos asociados.
Fito-estabilización	Reducción de la biodisponibilidad de contaminantes por inmovilización en sistemas radiculares y / o biomasa viva o muerta en el suelo de la rizósfera - creando un sustrato que permite el crecimiento de una cobertura vegetal. Cuando se ayuda con el uso de enmiendas del suelo, esto se denomina "fito-estabilización asistida".
Fito-volatilización	Uso de plantas para eliminar los contaminantes de la matriz de crecimiento, para después transformarlos y dispersarlos (o sus productos derivados) en la atmósfera.
Inmovilización <i>In situ</i> / Fito-exclusión	Reducción de la biodisponibilidad de contaminantes, inmovilizándolos o uniéndolos a la matriz del suelo mediante la incorporación de compuestos orgánicos o inorgánicos al suelo, solos o en combinación, para evitar la absorción excesiva de elementos esenciales y contaminantes no esenciales en la cadena alimentaria. La fito-exclusión es la aplicación de una cobertura vegetal estable, utilizando plantas excluidoras que no acumulan contaminantes en la biomasa vegetal cosechable; puede combinarse con inmovilización <i>in situ</i> .

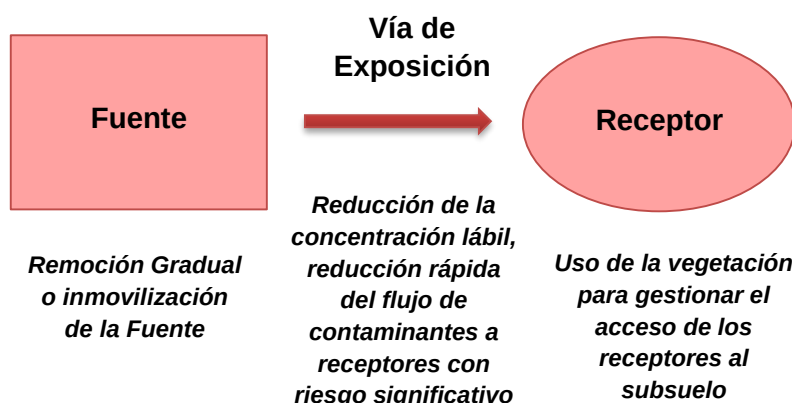


Figura 1. Ejemplo de estrategia de gestión de riesgos basada en GROS, adaptada a lo largo de los vínculos de contaminación. (Cundy, et al., 2015).

2.2 Técnicas de remediación de bajo insumo

2.2.1 Fito-tecnologías

En la mayoría de los suelos contaminados y los desechos de la mina, el mercurio (Hg) no está fácilmente disponible para la absorción de plantas (Moreno, et al., 2004). Una serie de estudios sobre sitios contaminados por minas artesanales han demostrado que el Hg está presente en los suelos oxigenados, sedimentos y relaves predominantemente como mercurio elemental (que puede estar unido al azufre y los óxidos de Fe / Mn en los suelos y sedimentos), o enlazados a materia orgánica (por ejemplo, en sedimentos (Pinedo-Hernández, et al., 2014)), y tiene una biodisponibilidad relativamente baja. Esto limita efectivamente el enfoque de fito-extracción directa, aunque varios autores han examinado el potencial de absorción de Hg inducida en plantas después de la adición de complejos a suelos contaminados (por ejemplo, enlaces que contienen azufre que unen Hg y mejoran su movilidad y disponibilidad para plantas en enfoques de fito-extracción asistida, (Moreno, et al., 2004)). Sin embargo, hay preocupaciones significativas sobre la lixiviación de Hg y la volatilización al aire en este tipo de enfoque, e incluso sobre el uso subsiguiente de biomasa que contiene Hg (para combustible, forraje animal, etc.). (Kennen y Kirkwood, 2015) observan en una revisión reciente de las fito-tecnologías que el Hg se considera un metal difícil de extraer para la captación vegetal y sostienen que el enfoque más efectivo de la remediación o manejo es a través de la estabilización del Hg *in situ* (mediante fito-estabilización o fito-estabilización asistida, dependiendo de las concentraciones de Hg presentes en el sitio) o filtrando físicamente las partículas que contienen Hg del agua. En el primer enfoque, puede ser necesario estabilizar el Hg y los co-contaminantes de la actividad minera en el suelo antes del crecimiento de la planta, debido a la fito-toxicidad del suelo. Para este fin, se pueden utilizar una serie de enmiendas del suelo, incluyendo compost, biocarbones y carbones activados (discutidos más adelante), y mezclas orgánico-minerales.

2.2.2 Biocarbón y carbón activado

Los biocarbones (biochar) y los carbones activados muestran un buen potencial para la adsorción y estabilización del Hg, dada la fuerte asociación de las especies de Hg con el carbono y con otros elementos como el azufre y el hierro que pueden estar presentes en los

biochar o asociados con las superficies de carbón activo. La inmovilización de Hg se controla tanto por la forma del mercurio (es decir, por su especiación) como por las características del biochar o carbón activado utilizado, tales como el área superficial activa, la química superficial y la distribución del tamaño del poro. (Gómez-Eyles, et al., 2013) compararon la adsorción de Hg con una gama de biochar y carbones activados comercialmente disponibles y sintetizados en laboratorio y observaron que mientras que los carbones activados con vapor eran significativamente más eficaces que los biochar en adsorción de Hg, ambos mostraron un rendimiento similar de adsorción (Fuerte) de metil Hg (MeHg). En concreto, el biochar se puede utilizar en combinación con la fitorremediación en un enfoque de fito-estabilización / mejora del suelo asistida (mencionado anteriormente), donde el biochar se utiliza para inmovilizar metales pesados (incluido el Hg) y actúa simultáneamente como acondicionador del suelo para aumentar el establecimiento y crecimiento de la planta -por ejemplo (Paz-Ferreiro et al., 2014)-. Esto a su vez, evita la erosión del suelo y la reelaboración, aumenta la materia orgánica del suelo y mejora la estructura del suelo.

3. Descripción de los Sitios Mineros de Colombia y las Muestras Evaluadas en Estudios de Laboratorio

En esta sección se describen brevemente los dos sitios relacionados con la minería de los que se tomaron muestras y se realizó un análisis de laboratorio para determinar el potencial de tratamiento del mercurio y de la contaminación con otros metales (Ver Sección 4). Si bien en esta sección se resumen los antecedentes de la selección de sitios y muestras en el contexto de las actividades mineras actuales y pasadas, así como los riesgos en estos sitios, el Anexo 1 proporciona un perfil completo de cada sitio en términos económicos, sociales, ambientales, ecológicos y otras dimensiones.

Pág | 7

3.1 Selección de los Sitios

En el Reino Unido, se realizaron ensayos a escala de laboratorios de inmovilización de mercurio (utilizando biocarbones adsorbentes de metal, desarrollados previamente por C-Cure) en muestras de suelo de dos municipios de Colombia: Segovia en el departamento de Antioquia y Tadó en Chocó. Estos municipios fueron seleccionados en consenso con el Ministerio de Energía y Minas y el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), teniendo en cuenta el historial de minería artesanal y el uso asociado de mercurio que se da en estas zonas del país. Además, la seguridad del personal de r3 Colombia fue también un factor importante en la selección de áreas para tomar muestras de suelo.

Las muestras iniciales se tomaron de áreas donde actualmente se extrae oro o se habían llevado a cabo actividades extractivas en el pasado (sitios abandonados). Junto con la orientación de los líderes comunitarios de las dos áreas, se realizó la identificación de localizaciones específicas en Segovia en concierto con personal del gobierno municipal, que forman parte de la Dirección de Agricultura, Minas y Medio Ambiente - DAMMA, así como se reconocieron zonas en Tadó en un área de minería de oro abandonada hace aproximadamente 8 años.

3.1.1 Descripción del Sitio 1: Segovia, Antioquia

Segovia es un municipio del departamento de Antioquia, ubicado 227 km al nordeste de la capital del departamento dentro de la región conocida como el Eje Cafetero; comprende 1.231 km² según el Plan de Desarrollo del municipio (Alcaldía de Segovia, 2008), es decir un 2% del territorio departamental (DNP, 2015). La Figura 2 presenta la ubicación de Segovia en el Departamento de Antioquia y en Colombia.

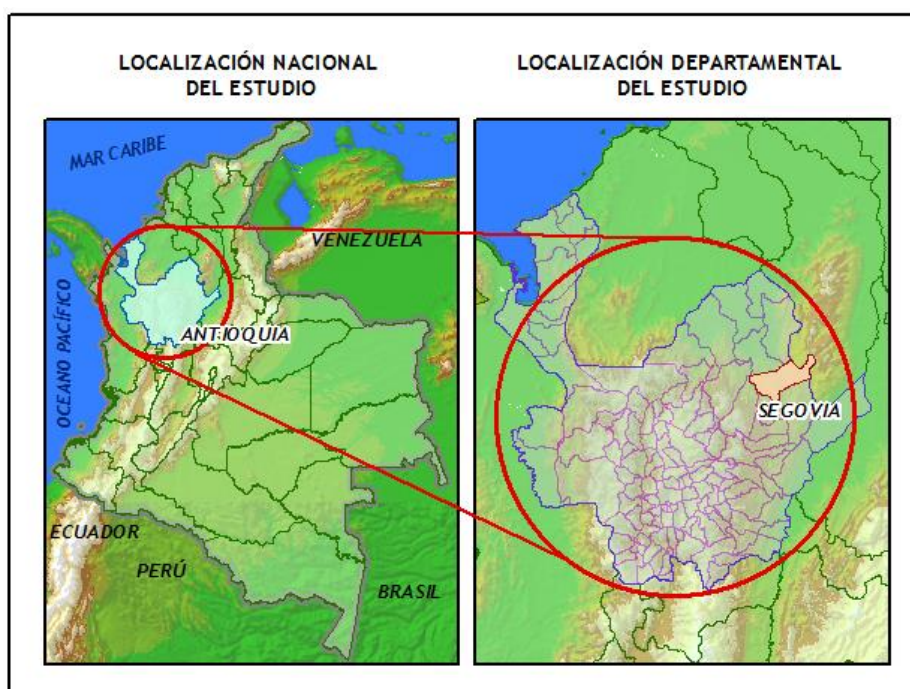


Figura 2. Ubicación del Municipio de Segovia a nivel nacional y departamental. Fuente: Ecodes Ingeniería, 2016.

Los tres mayores sectores de importancia en la economía del municipio de Segovia son, la extracción de minerales metálicos, que representa el 42,52% del valor agregado municipal per cápita, las empresas de servicios (10,22%) y el comercio (7%) (DNP, 2015). La minería de oro es la actividad minera más importante, ya que el municipio produce el 39,4% de todo el oro extraído a nivel regional y el 6,66% a nivel nacional (Alcaldía de Segovia - Antioquia, 2012). Segovia es un municipio de tradición minera, con una producción estimada de más de 3000 kg de oro y más de 1.700 kg de plata al año (DAMMA, 2008).



Figura 3. Sector Principal de la economía. Fuente: r3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.

La economía minera depende, en gran medida, de la minería artesanal y de algunos avances tecnológicos más que se han desarrollado a través de la historia.

Según la DAMMA de Segovia, se identifican ciento veintitrés mil hectáreas (123.000 Ha) aptas para la explotación minera; Sin embargo, el desarrollo de esta actividad se ha llevado a cabo de manera insostenible debido a la implementación de técnicas inapropiadas con alto impacto en los recursos naturales. Además, de 150 minas subterráneas de oro, sólo 10 unidades mineras están operando legalmente (DAMMA, 2008).

Riesgos y Amenazas

Según un informe sobre riesgos para la salud pública de la Oficina de Planificación de Segovia, se han identificado nueve factores de riesgo para la población local: el primero es la contaminación de fuentes de agua por recibir aguas residuales (tanto domésticas como comerciales e industriales de plantas de beneficio minero, Lavado de autos, entre otros) y los residuos sólidos; la contaminación atmosférica causada por el procesamiento del oro, la basura y la leña para cocinar, y el ruido y el smog de los automóviles en las zonas urbanas. Además, el 80% de la población muestreada en búsqueda de contaminación en orina por mercurio, tiene niveles de mercurio por encima de los niveles aceptables en la orina y el 20% restante son personas contaminadas con niveles muy cercanos al límite permisible (Alcaldía de Segovia, 2008).

Pág | 9

3.1.2 Descripción del Sitio 2: Tadó, Chocó

Tadó está ubicada al noreste del departamento de Chocó en Colombia, a unos 68 km de la capital provincial: Quibdó (Agualimpia Caicedo, 2012). La Figura 4 muestra la localización del municipio a nivel nacional y departamental.

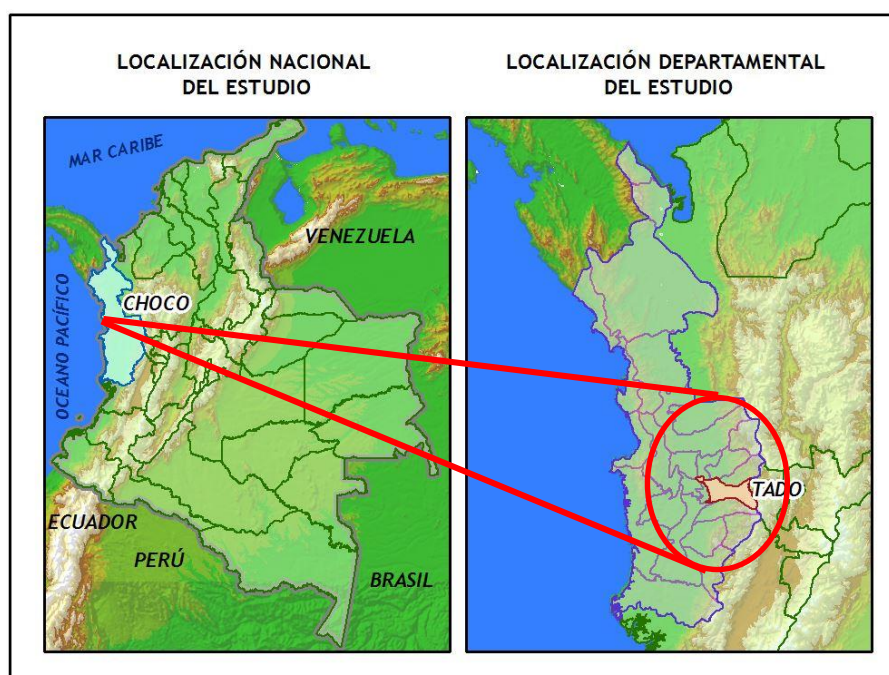


Figura 4. Localización de San José de Tadó (Tadó). Fuente: R3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.

Contexto de la Minería de Oro en Tadó

Tadó está dotado con gran riqueza en minerales dados sus aluviones auroplatiníferos ubicados en la Cuenca del río San Juan y sus afluentes, aunque también se extrae representativamente minerales como el cobre, carbón, plomo, zinc y petróleo (Palacios Perea, 2000). La manera en que se explotaba este recurso en la zona era artesanal, es decir por medio de tecnologías propias o etnotecnologías, como el “barequeo” o “mazamorreo”, como se muestra en la Figura 5. Esto implica mover solo pequeños volúmenes de grava dorada que facilita la asimilación y la resiliencia natural de las diferentes matrices ambientales afectadas. Sin embargo, la subida de los precios del oro ha llevado a la introducción de

tecnologías mecánicas más pesadas que acompañaron la llegada de medianas y grandes empresas con mayores impactos ambientales asociados.

Según datos de la producción mineral oficial de Colombia, suministrada por el Sistema Colombiano de Información Minera (SIMCO), el municipio de Tadó tiene la sexta mayor producción de oro en el departamento de Chocó: 751.73 Kg de oro por año (CODECHOCÓ, 2014). Sin embargo, estos datos no consideran la minería artesanal de oro; que se estima aumentarían en gran medida estos valores de producción.



Figura 5. Gente del común tratando de extraer oro en sitios abandonados. Fuente: R3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.

Según la autoridad ambiental del Departamento del Chocó, en 2010 cada asentamiento minero consumió 30 Kg de mercurio al año. Se hace necesario mencionar que las autoridades ambientales detectaron la presencia de 70 asentamientos mecánicos ilegales con retroexcavadoras (GOMIAN, 2014). Además, se estima que la deforestación anual debido a la minería de oro en la zona de San Juan (en la que se ubica Tadó) es cercana a las 50.000 hectáreas (GOMIAN, 2014).

Amenazas y Riesgos

En Tadó, la minería artesanal, también conocida como minería de subsistencia, se realiza ilegalmente; Además, se han desarrollado más explotaciones mineras de exploración y explotación a cielo abierto (Palacios Perea, 2000). Estas actividades han causado delitos ambientales, desplazamientos forzados, asesinatos, trabajo infantil, entre otras conductas ilegales (Palacios Murillo & Rengifo Arias, 2014).

En respuesta a estos riesgos, las respectivas entidades del área local han formulado el Plan de Ordenamiento y Gestión Ambiental de la Minería, con directrices y normativas para reducir los impactos y la ilegalidad; así como aumentar la sostenibilidad, exigir como responsabilidad el relleno y la recuperación de suelos y el registro de las explotaciones mineras. Estos cambios tienen como fin el acrecentamiento de las regalías, empleo formal y ganancias para la población de Tadó (Agualimpia Caicedo, 2012). Sin embargo, la población se ha manifestado insatisfecha, argumentando que el manejo de la formalización y legalización de la minería ignora la remediación de las actividades pasadas. Señalan que "la cuenca del río Atrato pasa por una notable crisis socio-ambiental", y exigen soluciones duraderas para proteger los derechos de la población que se encuentra expuesta a alto riesgo.

3.2 Muestreo

3.2.1 Segovia, Antioquia

Teniendo en cuenta la información anterior sobre la extracción de oro y en consulta con las autoridades locales, se seleccionaron dos sitios de muestreo: el primero, correspondiente a una mina actualmente desarrollada, donde se tomaron tres muestras; el segundo sitio, corresponde a un entable en el que se utiliza maquinaria para extraer los metales, principalmente el oro, allí se tomaron también tres muestras. El Anexo 1 contiene una descripción detallada del contexto y las ubicaciones para cada una de las seis muestras. Pág | 11

3.2.2 Tadó, Chocó

Un área de minería de oro abandonada hace aproximadamente 8 años, fue el sitio seleccionado para el muestreo del suelo. Este sitio está situado en la zona rural de Tadó y cubre un área de casi 1 Km².

La Figura 6 muestra la distribución de los puntos de recolección de muestra. Se tomaron un total de seis (6) muestras, cuatro (4) de las cuales se localizaron en áreas representativas del sitio y dos (2), cerca de las viviendas de los habitantes de la zona. Una descripción detallada de cada muestra se encuentra en el Anexo 1.



Figura 6. Distribución de puntos de muestreo. Zona rural de Tadó. Fuente: r3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.

4. Evaluación a Escala de Laboratorio de los Carbones de C-Cure para el Tratamiento del Mercurio en los Suelos Impactados

4.1 La Tecnología de C-Cure

Pág | 12

Las tecnologías licenciadas para C-Cure están diseñadas para acelerar la degradación de contaminantes orgánicos a través de la biorremediación o para inmovilizar contaminantes, incluyendo metales pesados adsorbiéndolos. Una vez adsorbidos en los productos C-Cure, los contaminantes ya no son lixiviables y no interfieren con los procesos biológicos (desintoxicación). En el caso de los metales pesados, el tratamiento C-Cure no reduce la concentración total de metales pesados, sino que los hace no biodegradables y no lixiviables. Esto significa que la aplicación de los productos C-Cure a suelos contaminados garantiza que las vías de los contaminantes hacia los receptores se interrumpan, de modo que los contaminantes ya no penetren en las aguas subterráneas y superficiales y ya no sean absorbidos por las plantas ni causen eco-toxicidad. Dependiendo de las condiciones del suelo, la adsorción de la mayoría de los metales pesados sobre los productos C-Cure es irreversible y estable, pero incluso si las condiciones del suelo condujeran a la desorción (como en casos de bajo pH del suelo), la estructura de los poros de los productos asegura que las condiciones internas sean amortiguadas o taponadas de las condiciones externas del suelo. De hecho, bajo condiciones desfavorables, se demostró que la desorción metálica de partículas de carbón que tenían 2 mm de diámetro era 2000 veces más lenta que la desorción metálica de la cal.

Además, la desintoxicación del suelo conduce a la restauración de la función normal del mismo y permite la revegetación. Tanto la adsorción de metales como la subsiguiente restauración ecológica garantizan la regeneración sostenible de los suelos contaminados.

4.2 Objetivos

Los objetivos de esta parte del proyecto, fueron los siguientes:

- Evaluar las concentraciones de mercurio lixiviable y otros metales en muestras de suelo tomadas de dos sitios de la mina en Segovia.
- Evaluar las concentraciones totales de mercurio y otros metales en muestras de suelo tomadas de los mismos dos lugares de Segovia.
- Determinar la forma química (mercurio, lixiviable, enlace orgánico, metilmercurio, elemental o ligado a sulfuros) en el que el mercurio estaba dentro de la muestra de suelo más contaminada para el mercurio.
- Comprobar la capacidad de los productos C-Cure para reducir el riesgo de mercurio extraíble por lixiviación y ácido estomacal en la muestra de suelo más contaminada con mercurio.
- Comprobar la capacidad de los productos C-Cure para reducir la capacidad de lixiviación de metales pesados distintos del mercurio.

4.3 Estándares de calidad ambiental para el mercurio y otros metales pesados

Para evaluar los riesgos asociados al suelo contaminado, hay una serie de Estándares Internacionales de Calidad Ambiental (EQS, por sus siglas en inglés) en uso que utilizan una variedad de criterios para determinar si los niveles de metales pesados encontrados en el suelo suponen un riesgo aceptable para los seres humanos y el medio ambiente. Estos incluyen los Valores Guía del Suelo (SGV), los Criterios de Aceptación de Residuos (WAC) y la Directiva Marco de Agua de la UE (WFD UE).

Pág | 13

Los Valores Guía del Suelo (SGV) y las notas de orientación técnicas de apoyo están destinados a ayudar a los profesionales en la evaluación del riesgo a largo plazo para la salud de la exposición humana a la contaminación química del suelo (EA, 2009). Existen diferentes SGV según el uso de la tierra (residencial, asignaciones, comercial) debido a que las personas usan el suelo de manera diferente y esto afecta a quién y cómo la gente puede estar expuesta a la contaminación del suelo. Los SGV son "valores de referencia" para la detección y descarte de zonas de bajo riesgo de contaminación de la tierra. Estos dan una indicación de los niveles medios representativos de los productos químicos en el suelo por debajo de los cuales los riesgos para la salud a largo plazo es probable que sea mínima. Superar un SGV no significa que la remediación sea siempre necesaria, sino que debe desencadenar investigaciones adicionales y una evaluación adicional del riesgo que un determinado contaminante podría plantear. Los valores de SGV se expresan como concentración total por kg de suelo [mg / kg] y por lo tanto no toman en cuenta la movilidad o biodisponibilidad de un elemento dado. La movilidad de metales pesados (y por lo tanto el riesgo que representan para la salud humana) depende en gran medida de factores ambientales, incluyendo el tipo de suelo y el pH del mismo.

Los Criterios de Aceptación de Residuos (Waste Acceptance Criteria - WAC) (EA, 2010) fueron introducidos en el Reino Unido para garantizar que los residuos potencialmente peligrosos se eliminan de manera segura para que ya no suponga un riesgo para los seres humanos y el medio ambiente. Los WAC evalúan los riesgos que los materiales contaminados presentan para el medio ambiente y los receptores humanos en las concentraciones de contaminantes lixiviables en agua y su toxicidad inherente. Los WAC se han fijado como valores límite máximos que no deben sobrepasarse para permitir la caracterización de un flujo de residuos específico en tres clases de peligro diferentes: «Residuos inertes no peligrosos», «Residuos peligrosos estables no reactivos» y «Residuos peligrosos». Los residuos que caen en cada clase requieren diferentes niveles de contención y manejo; los residuos clasificados como residuos peligrosos requieren las medidas y el seguimiento más estrictos, mientras que los residuos clasificados como «inertes» requieren una contención, una gestión y un seguimiento mínimos.

La Directiva marco de la UE sobre el agua, 2000/60 / CE (UE WFD) es el instrumento jurídico más importante en el ámbito del agua desarrollado por la UE para proteger las aguas superficiales de la contaminación. Los objetivos clave de la WFD son la protección general de la ecología acuática, la protección específica de hábitats únicos y valiosos, la protección de los recursos hídricos y la protección de las aguas para baño.

4.4 Muestras y análisis de muestras

Seis muestras fueron tomadas de cada uno de los diferentes sitios de Segovia con una historia de minería de oro (como se observa en el Anexo 2). El primer conjunto de 6 muestras se tomó de un área donde la minería estaba teniendo lugar; estas muestras se marcaron de S1 a S6. El segundo conjunto de muestras fue tomado de Tadó en Chocó, un sitio donde la minería había cesado; y fueron etiquetadas de T1 a T6.

Cada una de las muestras se evaluó para las concentraciones totales de metales y las concentraciones de metal lixiviable, usando procedimientos estandarizados. Posteriormente, se extrajeron muestras que contenían las concentraciones más elevadas de mercurio, usando un procedimiento de extracción secuencial para determinar si el mercurio era (a) soluble en agua, (b) soluble en ácido estomacal humano (c) unido a materia orgánica, (d) en forma elemental o (e) presente como sulfuro de mercurio.

4.5 Contaminación de mercurio

Todas las muestras tomadas del área donde se procesaba el suelo para la recuperación del oro (Muestras S1-S6) mostraron concentraciones elevadas de mercurio, siendo los niveles en las muestras S1, S2, S5 y S6 más de 10 mg Hg / kg de suelo, S3 60 mg Hg / Kg de suelo y S4 siendo 360 mg Hg / kg de suelo. De acuerdo con los Valores Guía del Suelo (SGV), los suelos que contienen concentración > 26 mg Hg / kg de suelo, se consideran inadecuados para cualquier uso, mientras que el suelo que contiene > 10mg Hg / kg de suelo, no debe usarse para construir viviendas (uso residencial), a menos que los vínculos con los contaminantes y los riesgos asociados se evaluarán más a fondo. Todas las muestras de Segovia (S1 a S6) excedieron el SGV para el uso residencial de la tierra, lo que justificaría una investigación más profunda de los posibles enlaces de contaminantes.

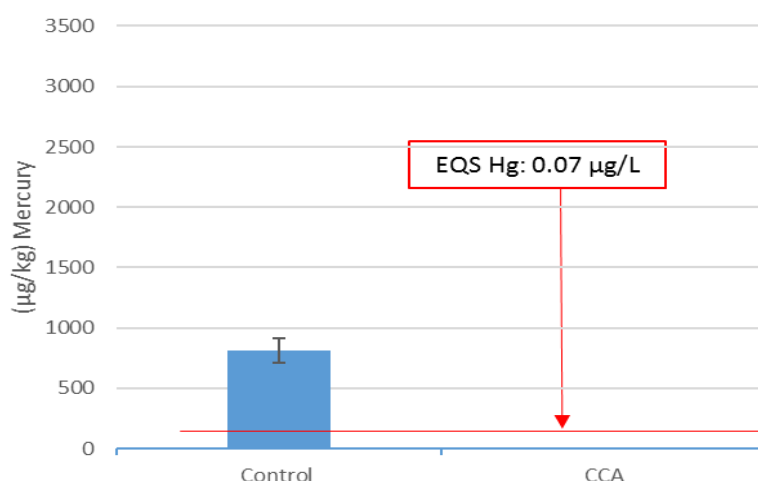
En contraste, las concentraciones totales de mercurio en las muestras tomadas de Tadó (muestras T1-T6), se encuentran entre 0,16 y 1,6 mg / kg. Estos valores están muy por debajo de los Valores Guía del Suelo (SGV) para uso residencial (SGV <10mg / kg) y comercial (SGV <26mg / kg). Sólo las muestras T1, T3 y T4 tuvieron concentraciones de mercurio que estuvieron por encima del valor de SGV para uso agrícola (SGV <1mg / kg) (Ver Figura 28 en el Anexo 2). De forma similar, ninguna de las muestras tomadas de Tadó fue contaminada con cantidades significativas de otros metales pesados (Ver la Tabla 13 en el Anexo 2).

De la cantidad total de mercurio encontrada en las diferentes muestras <0,1% era soluble en agua. En la muestra 4S esto ascendió a 0,38 mg / kg de mercurio, lo que clasificaría este material como peligroso de acuerdo con la regulación WAC. Las muestras 1T, 5T y 6T también fallaron en WAC para residuos inertes.

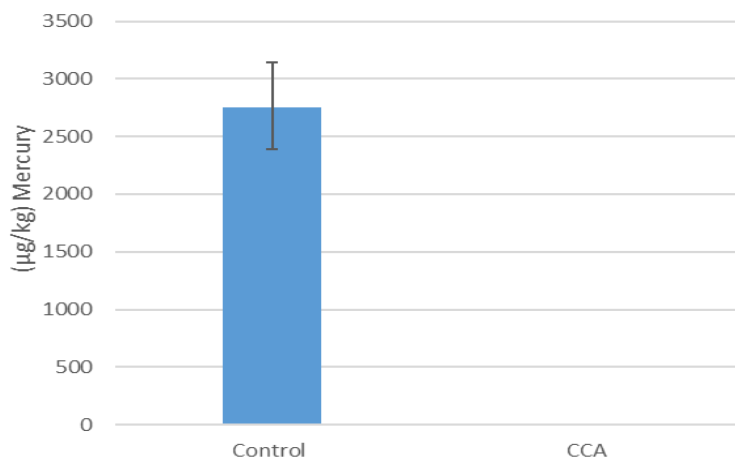
4.6 Tratamiento de la Contaminación de Mercurio usando productos de C-Cure

Debido a que la muestra de suelo 4S tuvo tanto la concentración de Hg total más alta (361 mg / kg) como la concentración de Hg lixiviable más alta (383 µg / kg), se usó para probar el tratamiento con el producto de tratamiento C-Cure-CCA.

Los análisis secuenciales demostraron que la muestra S4 no contenía mercurio unido a materia orgánica ni contenía metilmercurio, pero si contenía 812 $\mu\text{g} / \text{kg}$ de agua soluble y 2755 $\mu\text{g} / \text{kg}$ de mercurio soluble en ácido estomacal humano (Figura 7). El tratamiento con el producto C-Cure-CCA a una tasa de enmienda del 5% (m/m) dio como resultado que todo el mercurio hidrosoluble y soluble en el ácido estomacal humano se eliminara del suelo (Figura 7). En el suelo tratado con CCA se encontró que la mayoría (72%) del mercurio era extraíble con 10M de HNO_3 , lo que representa mercurio elemental. En el suelo no tratado, el porcentaje de mercurio extraíble de 10M HNO_3 fue del 51%.



a) Mercurio Soluble en Agua



b) Mercurio Soluble en Ácido Estomacal Humano

Figura 7. Cantidades de mercurio soluble en agua (a) y soluble en ácido estomacal (b), en suelos tomados del sitio de muestreo S4 en la muestra de control y muestras tratadas con 5% (masa/masa) del producto de C-Cure (CCA). N=2.

Una prueba adicional, destinada a cuantificar la cantidad mínima de producto C-Cure que se necesitaba para unir todo el mercurio soluble en agua y ácido estomacal, mostró que una tasa de enmienda de 0,5% (m/m) redujo la concentración de mercurio soluble en agua en 80 %, mientras que una tasa de enmienda del 1% resultó en la eliminación completa del mercurio soluble en agua (Figura 8).

Para eliminar todo el mercurio soluble en ácido estomacal, se necesitó una tasa de enmienda del 5%; mientras que una tasa del 3% (m/m) eliminó el 95% de todo el mercurio soluble en ácido estomacal del suelo (Figura 9).

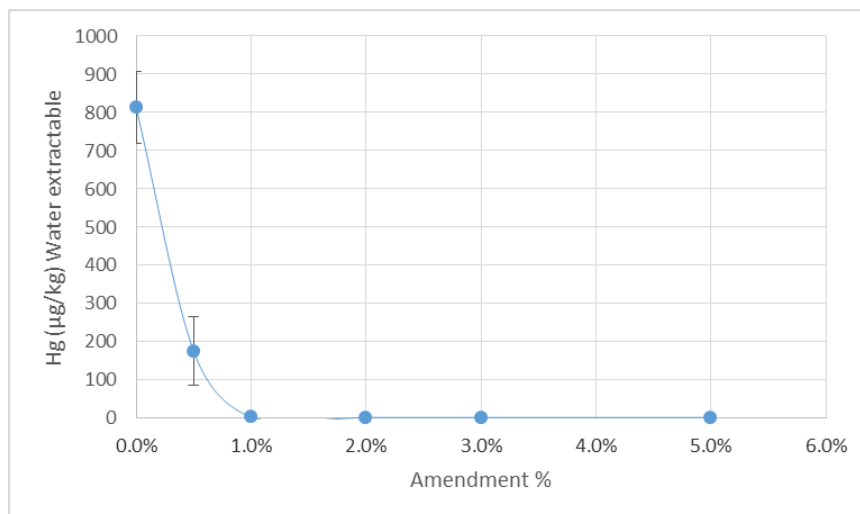


Figura 8. Concentraciones (µg/kg) de mercurio hidrosoluble, en la muestra S4 enmendada con cantidades crecientes (0, 0.5, 1, 2, 3 y 5% m/m) del producto de C-Cure (CCA). N=2.

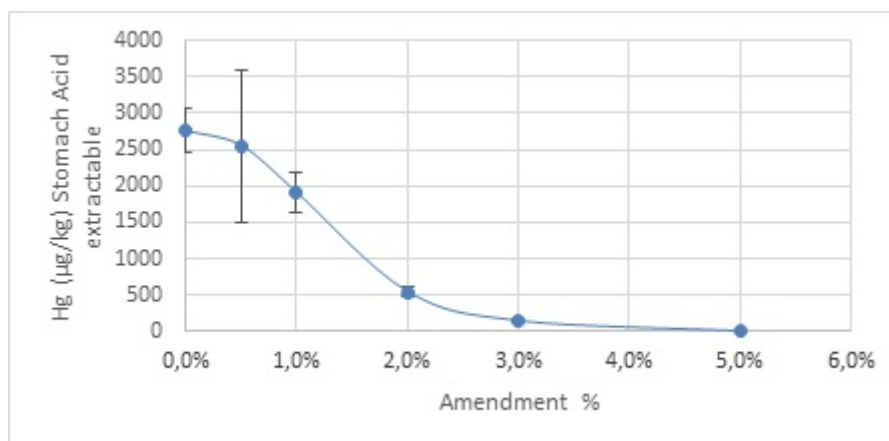


Figura 9. Concentraciones (µg/kg) de mercurio soluble en ácido estomacal, en la muestra S4 enmendada con cantidades crecientes (0, 0.5, 1, 2, 3 y 5% m/m) del producto de C-Cure (CCA). N=2.

4.7 Contaminación de Metales Pesados

La muestra más contaminada con respecto a los niveles de metales pesados lixiviables fue la muestra 3S. La capacidad de lixiviación de cadmio, plomo y zinc en esta muestra excedió los criterios de aceptación de residuos (WAC) de la UE para residuos peligrosos, lo que significa que el suelo en el sitio de muestreo S3 sería demasiado tóxico inclusive para ser dispuesto en un sitio de desechos peligrosos especialmente diseñado. La siguiente muestra más contaminada fue S2, que se clasificaría como residuo peligroso con base en los niveles de Zn lixiviable. La muestra S5 tenía concentraciones de cadmio que estaban por encima de la concentración de WAC Inerte. La mayoría de las muestras estaban suficientemente contaminadas para causar contaminación del agua si el suelo entraba en contacto con un río o un lago.

La muestra de suelo S3 tenía una de las concentraciones más altas de aluminio lixiviable (41 mg / kg), cadmio (32 mg / kg), hierro (1,66 mg / kg), plomo (109 mg / kg) y zinc (898,7 mg / kg) de entre todas las muestras (Ver Tabla 14 en el Anexo 2). De hecho, las concentraciones lixiviables de cadmio, plomo y zinc harían que este suelo fuera demasiado tóxico para ser vertido en un relleno sanitario especialmente diseñado.

4.8 Tratamiento de Contaminación de Metales Pesados usando productos de C-Cure

Por las razones expuestas previamente, la muestra S3 se usó para probar el producto de tratamiento de metales pesados estándar de C-Cure (C-Cure-TTLX).

El suelo se trató usando diferentes tasas de enmienda de aprox. 2,3% (m/m), 4,4% (m/m), 6,7% (m/m) y 8,9% (m/m) sobre la base del peso seco del suelo. Estas concentraciones son equivalentes a las tasas de modificación de 2,5, 5,0, 7,5 y 10% (m/m) sobre una base en peso húmedo (tal como se suministra). La Tabla 2 muestra el porcentaje de reducción para cada uno de los nueve metales al recibir tratamiento con los porcentajes indicados del producto C-Cure.

Tabla 2. Porcentajes de reducción en las concentraciones de metal lixiviable después del tratamiento con diferentes cantidades de producto de adsorción de metal de C-Cure.

Metal	Tasa de enmienda aplicada del producto C-Cure [% m/m]			
	2.3	4.4	6.7	8.9
Aluminio (Al)	97.8	100.0	100.0	100.0
Arsénico (As)	99.4	98.3	98.0	98.0
Cadmio (Cd)	0.0	84.6	94.7	95.9
Cromo (Cr)	98.0	98.1	98.1	98.5
Cobre (Cu)	94.7	99.2	98.8	98.9
Hierro (Fe)	100.0	100.0	100.0	100.0
Níquel (Ni)	4.7	86.5	94.2	91.4
Plomo (Pb)	19.6	97.1	97.8	98.7
Zinc (Zn)	9.6	93.5	97.7	96.9

La siguiente, es una discusión detallada de las concentraciones de los nueve metales resultantes del tratamiento con diversos niveles de enmienda del producto C-Cure. Como se muestra en la Tabla 3, dependiendo del metal, diferentes niveles de enmienda del producto

C-Cure tuvieron éxito en la reducción de las concentraciones de la mayoría de los metales para ser clasificados como inertes de acuerdo con los criterios UK WAC.

Las concentraciones lixiviables de aluminio pasaron de 947 mg / kg en el suelo no tratado a menos de 0,01 mg / kg en el suelo que fue modificado con el producto C-Cure al 2,3%, una reducción del 99,999% (Tabla 2). Esto significa que las muestras tratadas cumplirían con las más estrictas EQS (Tabla 3).

El níquel lixiviable se redujo en un 94% utilizando el tratamiento C-Cure. Las concentraciones lixiviables pasaron de 2,1 mg de Ni / kg de suelo a 0,12 mg de Ni / kg de suelo con una tasa de enmienda del 7,5% de producto C-Cure (Tabla 2). Este valor clasificaría el material como "inerte" de acuerdo con el WAC del Reino Unido (Tabla 3).

La concentración de cobre lixiviable pasó de más de 14mg / kg a 0.114mg / kg con una tasa de enmienda de 4.4%, una reducción de 99.2%. Esta disminución hizo que el suelo quedara por debajo del WAC para residuos inertes. El aumento de la tasa de enmienda por encima del 4,4% no dio lugar a nuevas reducciones del cobre lixiviable (Tabla 2).

La concentración de hierro lixiviable pasó de más de 1500 mg / kg de suelo en el control no tratado a 0,1 mg / kg en suelo modificado con una tasa de enmienda de 2,3% o más; Una reducción del 99,99% (Tabla 2). Esta concentración estaba muy por debajo de la concentración de hierro lixiviable que sería aceptable para la clasificación como residuo inerte de acuerdo con el WAC (Tabla 3).

La concentración de plomo lixiviable pasó de más de 26 mg / kg en el control no tratado a 0,34 mg / kg en el suelo modificado con el producto C-Cure al 8,9%; Una reducción del 98,7%. Se consiguió una reducción similar del plomo lixiviable con la mitad de la tasa de modificación (Tabla 2). El suelo no tratado sería clasificado como peligroso según WAC; sin embargo, después del tratamiento, la concentración restante de plomo lixiviable en el suelo tratado con C-Cure permitiría que el suelo fuera clasificado como residuo inerte de acuerdo con los criterios WAC (Tabla 3).

La concentración de zinc lixiviable pasó de más de 2000 mg / kg en el control no tratado a alrededor de 50 mg / kg en el suelo modificado con un producto C-Cure de > 6,7%. Considerando que el resto de Zn lixiviable sigue siendo considerado como peligroso, la clase de riesgo de suelos se redujo de "por encima de peligroso" a "residuo peligroso no reactivo estable" (Tabla 3).

La concentración de cadmio lixiviable pasó de 85,8 mg / kg a 3,5 mg / kg con una enmienda de 8,9% de TTLX, una reducción del 96% (Tabla 2). Esta reducción fue suficiente para reducir la clase de riesgo del suelo de 9 veces por encima de la clase de residuos peligrosos, hasta bien dentro de la categoría de residuos peligrosos según WAC (Tabla 3).

La concentración de cromo lixiviable pasó de más de 2 mg / kg a 0,114 mg / kg con una tasa de enmienda de 4,4%, logrando una reducción de 99,2%. Esto significa que la clasificación de peligros de este suelo pasó de "residuos peligrosos no reactivos" a "inerte" (Tabla 3).

La muestra S3 no tratada contenía 2000 µg de arsénico lixiviable por kg de suelo. Una tasa de enmienda del 2,5% con el producto C-Cure dio como resultado la eliminación casi completa del arsénico lixiviable (Tabla 2). La adición de más producto C-Cure-TTLX dio lugar a un pequeño aumento gradual en la capacidad de lixiviación de 12 µg / kg a una tasa de modificación de 2,3% (m/m) a 42 µg / kg a una tasa de enmienda del 10%. Esto significa que

la muestra tratada podría clasificarse como "inerte" según WAC. Además, los bajos niveles de arsénico lixiviable en la muestra tratada significaron que esta muestra no causaría contaminación del agua según los criterios de la WFD.

Tabla 3. Resumen de concentraciones de metales en muestras tratadas y no tratadas y clasificación de peligros antes y después del tratamiento con diferentes cantidades de producto adsorbente de metales de C-Cure. A menos que se especifique de otra manera, las clasificaciones de peligros se basan en los WAC, donde el verde representa el residuo inerte, el color amarillo representa el residuo peligroso no reactivo estable, el color ámbar representa el residuo peligroso y el rojo representa un residuo demasiado tóxico para ser aceptado en un relleno de residuos peligrosos.

Elemento	Tasa de Enmienda (% m/m)				
	0 (control)	2.3%	4.4%	6.7%	8.9%
Al* [µg/kg]	946733	20487	90	333	0
As [µg/kg]	2092	12	36	42	41
Cd [µg/kg]	85785	86663	13225	4534	3513
Cr [µg/kg]	2167	44	41	40	32
Cu [µg/kg]	14043	738	114	175	148
Fe* [µg/kg]	1519008	668	92	105	121
Ni [µg/kg]	2076	1978	281	121	179
Pb [µg/kg]	26607	21392	767	584	338
Zn [µg/kg]	2092372	1891961	136821	48919	64837

**EQS Basado en las directrices del marco comunitario sobre el agua*

5. Plan Propuesto de Pruebas In-Situ de Remediación Suave y Energías Renovables en Colombia

Se puede utilizar una variedad de posibles opciones de remediación suave, incluyendo tanto la fitorremediación como los enfoques de estabilización in situ. Las opciones de energía renovable incluyen la biomasa, el viento y la fotovoltaica. Esta sección propone dos planes de prueba como estudios de caso: el uso de caracteres modificados producidos por C-CURE como estudio de caso GRO y los próximos pasos para la implementación del sistema fotovoltaico como un estudio de caso de fuentes renovables.

Pág | 20

5.1 Pruebas in-situ de (bio)carbones modificados

5.1.1 Duración del Proyecto

Estimado de 18 meses

5.1.2 Objetivos e Introducción

Los resultados preliminares sugieren que la técnica de remediación con el producto C-Cure es muy eficaz para reducir los metales pesados y el mercurio lixiviable y biodisponible en los desechos de minas contaminados. Sin embargo, el trabajo hasta la fecha se fundamentó en la evaluación de laboratorio en un número muy limitado de muestras. Se requeriría más trabajo para probar y demostrar la técnica a una escala comercialmente relevante.

Este plan de proyecto propuesto comenzaría con un mapeo detallado de los niveles totales de contaminantes en cinco minas abandonadas y en seis desechos de proceso de minas actualmente explotadas. A continuación, se llevarán a cabo muestreos y análisis dirigidos para determinar la capacidad de lixiviación y la biodisponibilidad de los contaminantes, seguido de una optimización basada en laboratorio de la tasa de enmienda de los productos C-Cure. Esta información se utilizará junto con otros datos del sitio para formar un modelo de sitio conceptual de exposición potencial y riesgo para los receptores humanos, ganaderos y ecológicos. Este material será presentado y revisado con las partes interesadas del sitio para establecer los "criterios de éxito" del sitio para la actividad de remediación. La propuesta resultante se utilizará para seleccionar las áreas de ensayo para establecer y monitorear las parcelas de campo que demuestren la eficacia de la técnica.

5.1.3 Productos del Proyecto

El proyecto proporcionará los siguientes productos:

1. Un mapa de cinco sitios que muestra los niveles totales de metales pesados basados en los datos del estudio de campo.
2. Un informe del sitio según los Criterios de Éxito del Proyecto proporcionando especificación de costos para el despliegue a escala real para los sitios seleccionados usados en el ensayo de campo.
3. Estudios de caso para los sitios de ensayo que detallan el enfoque, demostrando la efectividad de la técnica y los beneficios más amplios para la población local y la calidad ambiental.

4. Una evaluación de viabilidad del mercado y de los beneficios locales para el uso generalizado de la técnica en Colombia.
5. Planes de despliegue de la técnica, incluyendo alianzas comerciales, necesidades de capacitación, planificación logística, necesidades de producción y oportunidades de empleo.

Paquete de trabajo 1: Investigación del sitio de los depósitos de residuos de minas abandonadas

Pág | 21

- 1.1 Realizar una inspección in situ de los niveles totales de metales pesados utilizando XRF Portátil a Campo (FP) en cinco sitios que se sospecha requieren remediación. Las muestras se tomarán basándose en un muestreo de rejilla [mínimo de 30 muestras] y en fuentes puntuales potenciales [por ejemplo, características distintas tales como depósitos de relaves finos]. Las muestras a granel se analizarán desde la superficie hasta 50 cm de profundidad. El muestreo de pozos se llevará a cabo en 3 a 4 lugares para determinar la profundidad total de los depósitos de material. La piedra y la textura del material se cuantificarán mediante observación en cada lugar de muestreo.
- 1.2 Documentar y localizar el mapa de las características del sitio / fuentes potenciales de contaminantes [por ejemplo cursos de agua, puntas de residuos, aguas de proceso], receptores potenciales [como viviendas, trabajadores, ganado, cultivos, aguas, elementos ecológicos] y vías de exposición [tales como erosión eólica, erosión hídrica, lixiviación, absorción de plantas, volatilización] mediante los cuales, los contaminantes podrían viajar directa o indirectamente desde fuentes a receptores.
- 1.3 Desarrollar un mapa superpuesto de los niveles totales de contaminantes y de la pedregosidad / textura con base en 1.1.
- 1.4 Identificar posibles enlaces de contaminantes dentro de un Modelo Conceptual de Sitio, tomando en cuenta los numerales 1.1 a 1.3.
- 1.5 Identificar siete áreas potenciales de 2 por 2 m para la remediación y ensayos piloto, con el fin de proporcionar una gama de tipos y niveles de contaminación basados en los resultados de 1.1 a 1.4. Realizar un muestreo selectivo de los suelos de materiales para áreas específicas sospechosas y analizar muestras de fracción fina (<2mm) para metales lixiviables y mercurio extraíble en ácido estomacal. Se utilizará un mínimo de 6 puntos de muestreo por parcela de 2 por 2 m.

Paquete de Trabajo 2: Evaluación de los residuos de las minas "frescas" o actualmente explotadas

- 2.1 Analizar seis desechos de proceso de minas actualmente explotadas, usando FPXRF.
- 2.2 Realizar análisis de laboratorio de cuatro desechos de proceso de minas actualmente explotadas seleccionadas [basados en los resultados de 2.1] para determinar los niveles de lixiviación de metales pesados y mercurio extraíble con ácido estomacal.

Paquete de Trabajo 3: Establecimiento de criterios de éxito del sitio a través de la participación y compromiso de las partes interesadas

- 3.1 Presentar y revisar los datos de investigación del sitio e identificar contaminantes de preocupación (CoCs), enlaces de contaminantes y vías contaminantes.

3.2 Hacer uso de los resultados del Paquete de Trabajo 1 para seleccionar cinco áreas de prueba y tres desechos de minas actualmente explotadas para representar una amplia variedad de tipos de materiales y propiedades.

3.3 Acordar los criterios de éxito del proyecto con el cliente, el propietario del sitio, el regulador y / o las partes interesadas más amplias. Esto debe incluir:

- a. Las concentraciones objetivo en el medio tratado o receptor [por ejemplo, concentraciones de contaminantes del suelo lixiviables, reducciones en las concentraciones de especies metálicas específicas, reducciones en el potencial de ingestión humana, reducciones en la erodibilidad del suelo a través de la re-vegetación].
- b. Éxito de re-vegetación [como cobertura terrestre alcanzada, crecimiento de plantas o de biomasa, concentraciones de contaminantes en tejidos vegetales].
- c. Una evaluación de los beneficios sociales, económicos y ambientales. Como mínimo, esto debería incluir beneficios para la población local y la economía local, o "Contenido Local". Esto debería incluir oportunidades de empleo de actividades de remediación y monitoreo, reducciones en la exposición a contaminantes, mejoras en salud ambiental, beneficios para la economía en general y beneficios secundarios, como facilitar que más personas abandonen condiciones de pobreza y puedan acceder a la educación. Las mejoras en la salud ambiental deben considerar los impactos ecológicos y humanos y ser delineadas por grupos demográficos de la población local. Los resultados de este ejercicio deben ser transferibles y escalables a un despliegue generalizado de la tecnología [Ver Paquete de Trabajo 6].

Pág | 22

Paquete de Trabajo 4: Optimización de laboratorio y preparación para la demostración en campo

4.1 Evaluar el tipo óptimo de enmienda C-Cure y la tasa de aplicación, utilizando estudios de laboratorio para áreas delimitadas en residuos abandonados y desechos de proceso de minas actualmente explotadas de tipo de contaminante, niveles y comportamiento de lixiviación.

4.2 Seleccionar cinco áreas de 2 x 2 m [parcelas] para demostración y valla/cerca para evitar daños de animales de pastoreo. Al menos una de las parcelas debe estar construida con residuos recientes de proceso minero.

4.3 Evaluar la idoneidad de las plantas para el establecimiento basado en el régimen de nutrientes del suelo, textura, capacidad de retención de agua, pH, CE, profundidad de enraizamiento, etc.

4.4 Abordar las deficiencias en los requerimientos de nutrientes de las plantas o en la capacidad de retención de agua del suelo mediante la selección de la co-enmienda apropiada [como materiales de compost, fertilizante mineral]. Las tasas de aplicación de los materiales fertilizantes deben basarse en especies de plantas objetivo y deben tener en cuenta la presencia de características locales, tales como cursos de agua, zanjas de drenaje, suministro de agua potable.

4.5 Evaluar la accesibilidad del sitio para las instalaciones y maquinaria.

4.6 Especificar el método de mezcla apropiado.

Paquete de Trabajo 5. Establecimiento de ensayo en campo

- 5.1 Cultivar el suelo en las parcelas. La profundidad de cultivo debe ser determinada por la profundidad de enraizamiento de la vegetación objetivo a ser establecida más 20 cm.
- 5.2 Los productos de enmienda de C-Cure y los materiales fertilizantes adicionales para determinar la profundidad de tratamiento para la vegetación seleccionada. Las tasas óptimas de aplicación deberían haber sido predeterminadas en las pruebas de laboratorio [Paquete de trabajo 3].
- 5.3 Parcelas de Semillas.

Paquete de Trabajo 6. Monitoreo y evaluación

Por lo general, se deben tomar muestras de suelo y agua [donde se está monitoreando el agua] en un mínimo de tres intervalos [inicio, medio, final] y vegetación [a medio ensayo y al final del ensayo]. Las muestras deben ser replicadas o al menos formadas por muestras voluminosas. El ensayo se llevará a cabo durante una temporada completa de crecimiento.

- 6.1 Monitorear concentraciones lixiviables de Contaminantes de Importancia y / o especiación de metales en muestras de material de suelo de las cinco parcelas de ensayo. Las muestras se tomarán fuera de las áreas de la parcela como controles.
- 6.2 Monitorear el establecimiento de vegetación, crecimiento [altura y / o biomasa], cobertura de suelo y absorción de Contaminantes de Importancia en la biomasa aérea.
- 6.3 Monitorear o modelar cambios en los enlaces de contaminantes basados en mediciones de campo y análisis de muestras.

Paquete de Trabajo 7. Presentación y Difusión de Resultados

- 7.1 Reportar según los Criterios de Éxito del Proyecto y proporcionar especificaciones de costo para el despliegue a escala completa.
- 7.2 Desarrollar estudios de caso para los sitios de ensayo que detallan el enfoque, demostrando la efectividad de la técnica y los beneficios más amplios para la población local y la calidad ambiental.
- 7.3 Realizar una evaluación de viabilidad y beneficios locales para el uso generalizado de la técnica en Colombia.
- 7.4 Desarrollar planes de despliegue para la técnica, incluyendo alianzas comerciales, necesidades de capacitación, planificación logística, necesidades de producción y oportunidades de empleo.

5.1.4 Estimaciones de costos del programa propuesto de pruebas in situ:

Paquete de Trabajo	Periodo de Tiempo	Costo (\$ COP) ³
PT 1: Investigación del sitio de los depósitos de residuos de minas abandonadas	Meses 1 a 3	162.000 k

³ Costo calculado según tasa de cambio de Libra Esterlina (GBP) a Peso Colombiano (COP) de 1 GBP son 3.600 COP. Valores enunciados en miles de pesos

Paquete de Trabajo	Periodo de Tiempo	Costo (\$ COP)³
PT 2: Evaluación de los residuos de las minas "frescas" o actualmente explotadas	Meses 1 a 3	18.000 k
PT 3: Establecimiento de criterios de éxito del sitio a través de la participación y compromiso de las partes interesadas	Meses 1, 3, 6, 9, 12, 15 y 18	68.400 k
PT 4: Optimización de laboratorio y preparación para la demostración en campo	Meses 4 a 6	151.200 k
PT 5: Establecimiento de ensayo en campo	Mes 7	162.000 k
PT 6: Monitoreo y evaluación	Meses 8 a 16	216.000 k
PT 7: Presentación y Difusión de Resultados	Meses 6, 12 y 18	115.200 k
	Total	\$892.800 k

Se puede disponer de un desglose más detallado de las actividades, los tiempos, los costos y los productos a petición.

5.2 Planificación del Despliegue de Energía Renovable

Después del tratamiento y recuperación del suelo, disminuyendo el riesgo por contaminación, generar una reutilización del sitio es muy importante. Una posibilidad es la generación de energía renovable.

Los pasos clave en la planificación del despliegue de energía renovable son los siguientes.

1. Realizar una evaluación de la tierra para ver la viabilidad que sirve al propósito. La EPA de Estados Unidos ha desarrollado una herramienta llamada "Árbol de decisión electrónica de Energías Renovables" para ayudar a determinar esta factibilidad de un sitio para el desarrollo de un proyecto de energía renovable, teniendo en cuenta su uso en sitios contaminados o degradados. La herramienta de árbol de decisiones está destinada a comprometer a los no expertos en energía renovable a detectar sitios potencialmente contaminados o subutilizados o vertederos para determinar si son buenos candidatos para proyectos fotovoltaicos o proyectos eólicos. Uno de los sitios considerados en este proyecto (Segovia) fue evaluado utilizando la herramienta EPA de los Estados Unidos y el hallazgo inicial fue que el sitio "Satisfizo los criterios sobre las características generales del sitio, consideraciones de reurbanización y evaluación de carga y financiera".
2. Estimar el costo general del proyecto en las condiciones locales. En referencia al mismo sitio, se desarrolló un ejercicio con proveedores locales, teniendo en cuenta

los costos actuales en el país y los beneficios que podría otorgarse la nueva ley en Colombia para estimar los costos generales de un proyecto piloto en un sitio de 2000 m².

6. Conclusiones y recomendaciones

Las opciones suaves de remediación (GRO) ofrecen oportunidades significativas para mitigar los riesgos del mercurio. El complicado comportamiento de especiación del Mercurio significa que es uno de los elementos tóxicos más difíciles de tratar, por lo que algunas GROs como la fito-extracción pueden no ser apropiados. Sin embargo, la inmovilización in situ es prometedora, en particular para proteger los recursos hídricos de la lixiviación del suelo. El trabajo inicial de la prueba, utilizando los biochars de C-CURE ha proporcionado una prueba preliminar de concepto. Sin embargo, esto debe ser mejor validado por un programa de estudios de campo. Parece probable que la inmovilización in situ será mejorada por la revegetación como un complemento para proporcionar la estabilidad del suelo y el mantenimiento del pH y las condiciones redox. La cubierta vegetal también debe diseñarse con minimización de la exposición humana, por ejemplo, el uso de cultivos no alimenticios, como por ejemplo energía o fibra, o para otros fines como el hábitat o la provisión de servicios o comodidades.

Pág | 26

Proporcionar una mitigación estable del riesgo facilitará la reutilización de la tierra afectada y la producción de energía renovable podría ser una importante oportunidad de reutilización, por ejemplo, en conjunto con proyectos locales de abastecimiento y de empresas comunitarias. Una serie de estudios iniciales de viabilidad de la energía renovable llevados a cabo, han confirmado el potencial de enfoques como la energía solar (fotovoltaica).

Si bien los enfoques de remediación descritos en este documento son prometedores para la mejora ambiental en muchos sitios diferentes afectados por la minería en Colombia, también es necesario que el gobierno colombiano refuerce la supervisión de la minería ilegal y los procesos no autorizados para implementar esta estrategia a mayor escala. Aunque el mercurio es uno de los problemas ambientales más relevantes, este proyecto reveló concentraciones muy altas de otros metales pesados que también causan problemas a los expuestos. Estos metales incluyen níquel, cadmio, plomo y cromo. Por lo tanto, es importante que las autoridades ambientales en Colombia aumenten la conciencia dentro de la industria minera de los problemas de la exposición no sólo al mercurio, sino también a otros metales y para establecer sistemas de monitoreo en áreas con sospecha de contaminación.

El uso de biochar como una técnica de remediación de bajo insumo fue muy eficaz en la inmovilización del mercurio, así como una serie de los metales analizados. Es importante continuar este proyecto a mayor escala (como se propone en el documento) para validar los resultados de las pruebas de laboratorio en condiciones de campo y proporcionar entendimiento para cuestiones de implementación tales como escala, economía y otros. Además, se podría realizar un segundo análisis detallado de campo y piloto en un antiguo sitio minero para un proyecto de energía renovable para mostrar el vínculo entre la restauración del sitio minero y el uso sostenible.

Recursos adicionales

Este informe se apoya tanto en la información complementaria de los anexos como en las referencias señaladas en esta guía. También se puede descargar información adicional de <http://www.r3environmental.com.co/es/descargas.html>, incluyendo una versión en español de la guía de oportunidades aquí descrita y los otros productos públicamente disponibles de este proyecto:

- Producto 2: Estrategias para la rehabilitación de tierras mineras contaminadas con mercurio para energías renovables y otras estrategias de reutilización autosostenibles [*Orientación y estrategias para la reutilización de tierras mineras contaminadas, mediante la transferencia de conocimientos de última generación y de enfoques de implementación exitosos del Reino Unido, la UE y América del Norte, adaptándolos a la situación local en Colombia*]
- Output 3: Informe de política para los gobiernos regionales y nacionales en Colombia. [*Un informe de política para los gobiernos regionales y nacionales en Colombia. En el documento se describen las estrategias para tratar los yacimientos mineros contaminados y se abordan los compromisos políticos contenidos en la Ley 1658 de 2013, el compromiso de Colombia con el Convenio Minamata de las Naciones Unidas (el Plan Único de Mercurio), el Acuerdo Climático de París 2015 y la adhesión colombiana a la OCDE*]

Próximos Pasos

La recomendación de este informe es que el trabajo de pruebas de despliegue sobre el terreno debe iniciarse con carácter urgente, dado el potencial que tienen las GRO para la mitigación del problema del mercurio en Colombia.

7. Referencias

Agu Limpia Caicedo, M. A. (2012). *Plan Municipal para la Prevención, Atención, Asistencia y Reparación Integral a las Víctimas del Conflicto Armado 2012-2015*. Chocó. San José de Tadó: Alcaldía Municipal de Tadó.

Alcaldía de Segovia - Antioquia. (18 de Septiembre de 2012). *Nuestro Municipio*. Recuperado el 22 de Julio de 2016, de Segovia - Antioquia: http://www.segovia-antioquia.gov.co/informacion_general.shtml

Pág | 28

Alcaldía de Segovia. (2008). *Plan de Desarrollo Municipal 2008-2011 "Con Sentido de Pueblo"*. Municipio de Segovia.

Alcaldía Municipal de Segovia. (2002 - 2011). *PBOT*. Municipio de Segovia.

CODECHOCÓ. (2014). Determinación de los valores per-cápita de generación de carga contaminante de la actividad minera en el departamento del Chocó. Corporación Autónoma Regional para el desarrollo sustentable de Chocó, Subdirección de Calidad y Control Ambiental, Quibdó. Obtenido de: http://codechoco.gov.co/portal/archivos/tasa_retributiva/valores_percapita_mineria.pdf

Cundy, Bardos, P. R., Church, A., Puschenreiter, M., Friesl-Hanl, M., Müller, I., . . . Vangronsveld, J. (2013). Developing principles of sustainability and stakeholder engagement. *Environmental Management* (129 (2013)), pp. 283-291.

Cundy, Bardos, P. R., Puschenreiter, M., Mench, M., Bert, V., Friesl-Hanl, W., . . . Vangronsveld, J. (2016). Brownfields to green fields: Realising wider benefits from practical contaminant phytomanagement strategies. *Environmental Management*. doi:10.1016/j.jenvman.2016.03.028

Cundy, Bardos, P., Puschenreiter, M., Witters, N., Mench, M., Bert, V., . . . Vangronsveld, J. (2015). Developing Effective Decision Support for the Application of "Gentle" Remediation Options: The GREENLAND Project. *Remediation*, 25(3), pp. 101-114. Recuperado de www.wileyonlinelibrary.com

DAMMA. (2008). *Plan de Acción: Áreas de Desarrollo*. Segovia, Antioquia, Colombia.

DANE. (06 de Julio de 2016). *Estadísticas Sociales*. Obtenido de Departamento Administrativo Nacional de Estadística: <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-sociales/necesidades-basicas-insatisfechas-nbi>

DANE. (2005). *Boletín Perfil Segovia - Antioquia*. Bogotá: DANE.

DANE. (2005). *Perfil Tadó-Chocó*. Boletín Censo General 2005, Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Censos y Demografía, San José de Tadó. Recuperado el 06 de Julio de 2016, de <http://www.dane.gov.co/files/censo2005/perfiles/choco/tado.pdf>

DNP. (2015). *Fichas de Caracterización Territorial Municipal*. Bogotá.

DNP. (2016). *Fichas Municipales de Caracterización Territorial*. Fichas, Departamento Nacional de Planeación, Desarrollo Territorial, Bogotá. Recuperado el Julio 07, 2016,

de <https://www.dnp.gov.co/programas/desarrollo-territorial/Paginas/Fichas-de-Caracterizacion-Regional.aspx>

EA (2009). Using Soil Guideline Values. Better Regulation Science Programme. Science report: SC050021/SGV Introduction. Environment Agency, Bristol, UK.

EA (2010). Waste acceptance at landfills: Guidance on waste acceptance procedures and criteria. Environment Agency, Bristol, UK.

Pág | 29

Gobierno de Antioquia. (2013). Anuario de Estadística de Antioquia. Departamento Administrativo de Planeación. Medellín: Departamento Administrativo de Planeación. Obtenido de http://www.antioquia.gov.co/images/pdf/anuario_2013/es-CO/capitulos/indicadores/calidad/cp-14-2-1.html

Gomez-Eyles, J. L., Yupanqui, C., Beckingham, B., Riedel, G., Gilmour, C., & Ghosh, U. (2013). Evaluation of biochars and activated carbons for in situ remediation of sediments impacted with organics, mercury and methylmercury. *Environ. Sci. Technol*, 47, 13721-13729.

GOMIAN. (2014, noviembre). Fact Sheet - Case Study. Oro Verde Program in the municipalities of Condoto and Tadó, Chocó. Recuperado de Small Scale Gold Mining in the Amazon - GOMIAN: <http://www.gomiam.org/omhoogladden/2014/11/factsheet-colombia-case-oro-verde.pdf>

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, Universidad de Manizales, WWF Colombia. (6 de Marzo de 2013). *Libro Rojo de Peces Dulceacuícolas de Colombia en 2012*. Obtenido de WWF: <http://www.wwf.org.co/?207781/Libro-Rojo-de-Peces-Dulceacucolas-de-Colombia-2012>

Kennen, K., & Kirkwood, N. (2015). *Phyto: Principles and resources for site remediation and landscape design*. London: Routledge.

Mateus, A. (2012). *Guía de Buenas Prácticas de Colombia para la Cooperación Sur-Sur: Índice de Pobreza Multidimensional*. Guía, Departamento Nacional de Planeación, Dirección de Desarrollo Social - Subdirección de Promoción Social y Calidad de Vida, Bogotá. Recuperado el 2016, de https://www.apccolombia.gov.co/recursos_user/Documentos/Oferta/Indice-Pobreza-Multidimensional-IPM.pdf

Medina Mosquera, F. M., Ayala Mosquera, H. J., & Perea, J. D. (2011). Determinación de la contaminación mercurial en personas vinculadas con la minería de oro en el Distrito Mineo del San Juan, Departamento del Chocó, Colombia. *Bioetnia*, 8(2 (Julio-Diciembre)), 195-206.

Moreno, F. N., Anderson, C. W., Stewart, R. B., & Robinson, B. H. (2004). Phyto remediation of mercury-contaminated mine tailings by induced plant-mercury accumulation. *Environ. Pract.*, 6, 165-175.

Palacios Murillo, Y., & Rengifo Arias, C. G. (2014). Estudio del Impacto Ambiental y Social de la Explotación minera en el Municipio de Tadó del Departamento del Chocó. Una mirada desde el Trabajo Social. Medellín: Corporación Universitaria Minuto de Dios.

- Palacios Perea, C. E. (2000). EOT Tadó. Tadó, Chocó: Alcaldía Municipal.
- Paz-Ferreiro, J., Lu, H., Fu, S., Méndez, A., & Gascó, G. (2014). Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: a review. *Solid Earth*, 5, 65-75.
- Pinedo-Hernandez, J., Marrugo-Negrete, J., & Diez, S. (2014). Speciation and bioavailability of mercury in sediments impacted by gold mining in Colombia. *Chemosphere*, 119C, 1289-1295.
- Semana - Nación. (29 de Marzo de 2013). Minería ilegal: entre el oro y el crimen. *Semana*. Obtenido de <http://www.semana.com/nacion/articulo/oro-crimen-mineria-ilegal/338107-3>
- Tutela por violación de los Artículos 1, 2, 7, 11, 13, 44, 49, 366 de la Constitución de Colombia, y la violación de los derechos fundamentales a la vida, la salud, el agua, la comida y el territorio. (Tribunal Administrativo de Cundinamarca 2015).
- UNGRD. (2016). *Alerta Roja: Amenaza alta ocurrencia de incendios de la cobertura vegetal en Segovia - Antioquia*. IDEAM. Sistema Nacional de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres. Recuperado el Julio de 2016, de <http://gestiondelriesgo.gov.co/snigrd/alertas.aspx?id=140718>
- Vangronsveld, J., Colpaert, J., Van Tichelen, K., & Clijsters, H. (1995). Reclamation of a bare industrial area contaminated by non-ferrous metals: physico-chemical and biological evaluation of the durability of soil treatment and revegetation. *Environ. Pollut*, 94, 131-140.
- Vangronsveld, J., Herzig, R., Weyens, N., Boulet, J., Adriaensen, K., Ruttens, A., . . . Mench, M. (2009). Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. *Environ. Sci. Pollut*, 16(7), 765-794. doi:10.1007/s11356-009-0213-6
- Witters, N., Mendelsohn, R., Van Slycken, S., Weyens, N., Schreurs, E., Meers, E., . . . Vangronsveld, J. (2012). Phytoremediation, a sustainable remediation technology? Conclusions from a case study. I: Energy production and carbon dioxide abatement. *Biomass Bioenergy*, 39, 454-469. doi:10.1016/j.biombioe.2011.08.01

Anexo 1: Descripción detallada de los sitios mineros de Colombia y muestras relacionadas evaluadas en estudios de laboratorio

En el Reino Unido, se realizaron ensayos a escala de laboratorio para la inmovilización de mercurio (utilizando biocarbones adsorbentes de metal desarrollados previamente por C-Cure) en muestras de suelo de dos municipios de Colombia: Segovia en el departamento de Antioquia y Tadó en Chocó. Los sitios fueron seleccionados en común acuerdo con el Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), teniendo en cuenta el historial de minería artesanal y el uso asociado de mercurio que se da en dichos municipios. En adición, factores como la seguridad para el personal de r3 Colombia también fue un elemento importante que se tuvo en cuenta al seleccionar las áreas para tomar muestras de suelo.

Descripción del Sitio 1: Segovia, Antioquia

Segovia es un municipio del departamento de Antioquia, ubicado 227 km al nordeste de la capital del departamento dentro de la región conocida como el Eje Cafetero; comprende 1.231 km² según el Plan de Desarrollo del municipio (Alcaldía de Segovia, 2008), es decir un 2% del territorio departamental (DNP, 2015).

Geográficamente, sus coordenadas corresponden en Latitud Norte a 7°04'28" y 74°41'56" de longitud Oeste; abarca altitudes entre los 500 hasta los 1000 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), con altitud promedio en su cabecera municipal de 650 m.s.n.m. La Figura 10 presenta la ubicación de Segovia en el Departamento de Antioquia y este en Colombia.

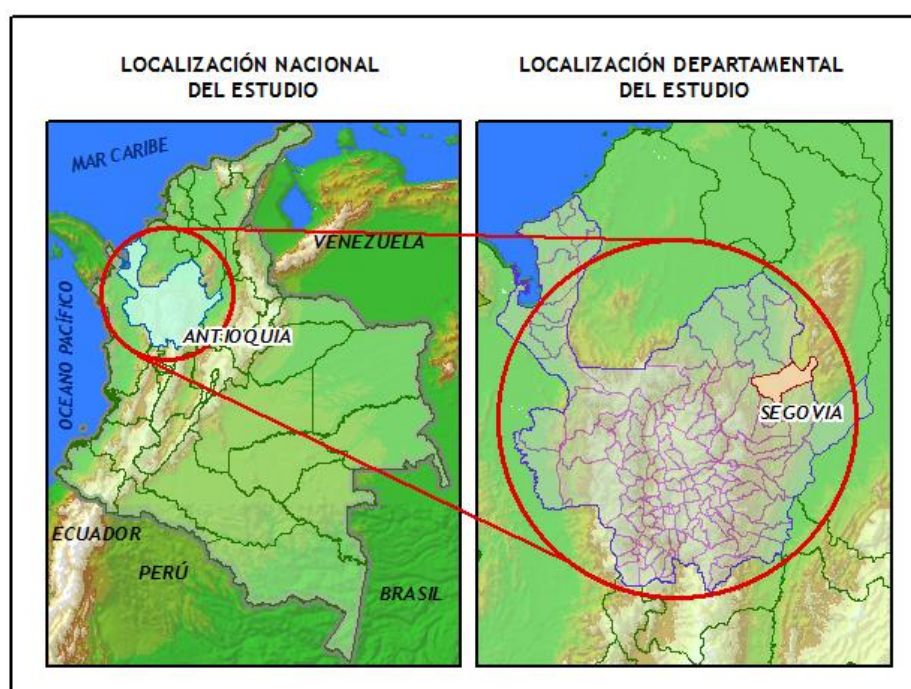


Figura 10. Ubicación del Municipio de Segovia a nivel nacional y departamental. Fuente: Ecodes Ingeniería, 2016.

La vía terrestre que comunica al municipio de Segovia es la troncal del nordeste, la cual ha recibido inversiones, resultando en mejoría de condiciones notorias en la movilidad, con un tiempo aproximado de recorrido de 5 horas desde Medellín. Este servicio de transporte lo cubren principalmente las empresas Transporte Segovia y Flota Nordeste, que prestan el servicio de carga y de pasajeros especialmente Segovia-Medellín y viceversa; y a nivel local,

para comunicación entre la cabecera municipal y las veredas, el servicio lo prestan las empresas Transporte Segovia y la Cooperativa de Transportadores (Alcaldía de Segovia - Antioquia, 2012). El área rural carece de comunicación mediante vías terciarias de buen estado, lo que ha repercutido en las condiciones de desarrollo e inversión para lograrlo (Alcaldía de Segovia, 2008).



Figura 11. Carretera terciaria de acceso entre zonas urbanas y rurales. Fuente: r3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.

La vía aérea existía por el aeropuerto Otú en el municipio limítrofe Remedios, mas la frecuencia de vuelos e inaccesibilidad económica a los vuelos hizo que esta forma de comunicación con el municipio se terminara. Finalmente, el municipio no cuenta con vía fluvial.

Economía y Productividad

Los tres mayores sectores de importancia en la economía del municipio de Segovia son en orden descendente según las estadísticas recopiladas por el DNP, la extracción de minerales metálicos, que representa el 42,52% del valor agregado municipal per cápita, las actividades de servicios (10,22%) y el Comercio (7%); entre otros (18.9%) como energía eléctrica, construcción de edificaciones, transporte por vía terrestre, hoteles, restaurantes y bases, servicios sociales y de salud de mercado, administración pública y defensa (DNP, 2015). De esta manera, se evidencia que la productividad segoviana se basa en los tres primeros sectores mencionados; siendo la explotación aurífera de gran significancia, dado que el municipio produce el 39,4% del total de oro extraído a nivel regional y el 6,66% a nivel nacional (Alcaldía de Segovia - Antioquia, 2012).



Figura 12. Sector principal de la economía. Fuente: r3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016

Dentro de otras actividades económicas realizadas en Segovia, también figura la ganadería, concentrada en pocas fincas con baja productividad debido a la dificultad de producir pastos saludables, la explotación maderera, cuya producción se procesa en otras ciudades; y la agricultura a pequeña escala, principalmente para el auto-sostenimiento de la población que la desarrolla. A pesar que el municipio cuenta con terrenos para actividades agrícolas, la producción es insuficiente incluso para el consumo interno (Alcaldía de Segovia, 2008).

Amenazas y Riesgos

Según el reporte de diagnóstico de salud realizado a la Secretaría de Planeación de Segovia, se identifican nueve factores de riesgo: el primero es la contaminación de fuentes hídricas por la recepción de aguas residuales tanto domésticas como comerciales e industriales (de entables mineros, lavaderos de automóviles) y de residuos sólidos, contaminación del aire a causa de las quemas de oro, de basuras y leña para cocinar, también por ruido y smog de automóviles en el área urbana; las aguas residuales también son vertidas al suelo y allí se disponen igualmente desechos (Alcaldía de Segovia, 2008). Uno de los riesgos antrópicos se centra en la explotación maderera, principalmente de árboles nativos como Abarco, Sapán, Coco Cabuyo, Perillo, entre otros (Alcaldía de Segovia - Antioquia, 2012), lo cual conlleva al deterioro de la selva virgen tropical y genera riesgos ecológicos.



Figura 13. Piscina con agua de lixiviado de cianuro o mercurio. Fuente: r3 Environmental technology Colombia SAS, 2016

Otro factor de riesgo para la salud humana son los vectores y las enfermedades que estos transmiten como el Dengue y fiebre amarilla transmitidas por el mosquito Aedes y la Malaria y Leishmaniasis. La proliferación de estos se da principalmente por el almacenamiento de agua para uso y consumo en las viviendas a causa de la discontinuidad en el servicio de acueducto. Así mismo, se identificaron riesgos a la salud sexual debido a la extensión en la prostitución, consumo de bebidas alcohólicas y sustancias psicoactivas, riesgo a la salud mental por violencia intrafamiliar, agresión física, violencia de grupos armados y desplazamiento, y riesgos laborales y ergonómicos, principalmente en la actividad de minería (Alcaldía de Segovia, 2008).

Por último, se encuentran los riesgos de origen natural, como lo son los deslizamientos principalmente en los barrios de la periferia, vendavales, vientos huracanados, lluvias torrenciales e inundaciones en los barrios bajos (Alcaldía de Segovia, 2008). Dentro de esta categoría, también se reportan por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios

Ambientales - IDEAM recientemente, incendios de cobertura vegetal con alta recurrencia en zonas de bosques, cultivos y pastos (UNGRD, 2016).

En general, y con base en la información de grados de amenaza en contraste con el nivel de atención prestado a la misma, se identifica que el 50% de los barrios de la zona urbana se clasifican dentro del alto riesgo por fenómenos naturales y un 100% presenta un riesgo por fenómenos antrópicos (Alcaldía de Segovia, 2008).

Aspectos Sociales

Demografía

El territorio municipal aloja un total de 40.174 personas según el reporte del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas – DANE al Departamento Nacional de Planeación – DNP en el 2015, de las cuales 31.934 se ubican en la cabecera municipal (79,49% del total) y 8.240 en el resto del área municipal (20,51%); de esta manera, se encuentra una densidad poblacional de 32,24 personas por Km² (DNP, 2015). Así mismo, su demografía se caracteriza por tener una representatividad muy pareja de hombres y mujeres, siendo esta de 49,9% y 50,1% respectivamente (DANE, 2005).

Como se observa en la Figura 14 y conforme al reporte del DANE en 2015, la población potencialmente activa, que comprende el rango de edades entre los 15 y 59 años es de 62,1% y la inactiva de 37,9% (DNP, 2015), correspondiente a la población fuera del rango mencionado anteriormente. Así mismo, se evidencia en la pirámide un efecto de migración en ambos sexos, mortalidad masculina y alta natalidad. Es de resaltar que el 43,1% de la población caracterizada en el censo realizado en el 2005 no nació en el municipio, pero migró hacia allí y más del 90% llevan residiendo un periodo superior a 5 años (DANE, 2005).

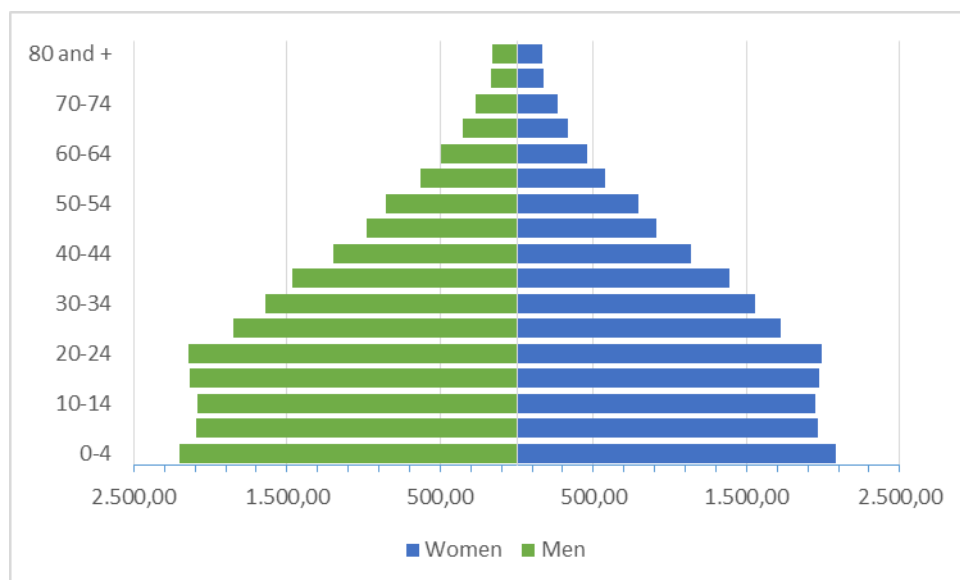


Figura 14. Pirámide de población por rangos de edad y sexo. Fuente: (DNP, 2015).

Por otro lado, Segovia alberga 406 personas que se auto identifican como indígenas, 6.666 como negros, mulatos y afrocolombianos y 6 raizales. Adicionalmente, se registra un resguardo indígena en el municipio (DNP, 2015). Ellos conforman la población étnica que da

un total de 7.078 personas, lo que representa un 17,62% de la población en 2015, que ha disminuido con respecto al 19,6% que se reportó por el DANE en el censo realizado en 2005.

Calidad de Vida

El índice de NBI (Necesidades Básicas Insatisfechas) determina, con base en indicadores simples (como viviendas inadecuadas, hacinamiento crítico, servicios inadecuados, alta dependencia económica, inasistencia escolar o analfabetismo), la cantidad de necesidades básicas de la población que no se encuentran cubiertas (DANE, 2016). En el 2005, la población refleja en el censo un índice de 41,37 (DNP, 2015), esto significa que el 41.37% de los hogares del municipio de Segovia se encuentran en condiciones de pobreza con alta cantidad de necesidades básicas insatisfechas (de aquellos descritos previamente), lo cual es 3.33 veces el índice obtenido en la población de Medellín (capital del departamento de Antioquia), y también corresponde a 1,8 veces las NBI del departamento. Sin embargo, este índice es característico de la subregión en la que se encuentra localizado el municipio de Segovia (Subregión del Nordeste con 42,23% de NBI en el total de su población) (Government of Antioquia, 2013).

Otro índice para evidenciar calidad de vida en una población es el IPM (Índice de Pobreza Multidimensional), el cual refleja el grado de privación de las personas en un conjunto de dimensiones; este permite determinar la naturaleza de la privación en las dimensiones seleccionadas (condiciones educativas, niñez y juventud, trabajo, salud, servicios domiciliarios y condiciones de la vivienda) y la intensidad de la misma (Mateus, 2012). Al respecto, se observa una mejoría en el IPM, que se registra de 44,3 para el 2005 y en 9 años disminuyó a 19,5; sin embargo, este cálculo se realizó a través de resultados del censo de 2005 con un promedio ponderado de la población de cada año subsiguiente (DNP, 2015).

Conflicto Armado

Uno de los eventos más reconocidos de violencia en Segovia ocurrió en 1998, uno de los bloques del Ejército Liberal Nacional – ELN; consistió en el ataque al puente que cruza el río Pocuné en Machuca, dejando terribles consecuencias. El motivo de disputas principal es el tramo del oleoducto de Ecopetrol (Empresa Colombiana de Petróleos) que pasa por el corregimiento de Fraguas (Alcaldía de Segovia - Antioquia, 2012).

Las medidas tomadas en la región, junto con el acompañamiento realizado por las instituciones públicas estatales y empresas como Ocesa y Frontino Gold Mines, ha permitido levantar la imagen del municipio y lo más importante: la tranquilidad de la población y así mismo, la economía que desarrollaban comenzó en auge. Sin embargo, últimamente se ha evidenciado que la minería ilegal (una de las actividades principales) ha desarrollado vínculos con grupos armados; así lo reporta la revista Semana en uno de sus reportajes, en el que menciona además que, según un estudio de la Fundación Ideas para la Paz, “en más de la mitad de los municipios productores de oro, hay presencia de bandas criminales” y resalta que la policía ha capturado a varios miembros de estas bandas en plena explotación de minas (Semana - Nación, 2013). Esto ha dificultado el tema de seguridad, agregado a las disputas por ingreso en terrenos ajenos para explotación de oro.

Aspectos de Agua Potable y Saneamiento Básico

Como parte del sistema de servicios públicos domiciliarios, Segovia cuenta con acueductos urbanos, corregimentales, y veredales para suministro del agua, captada de la cuenca alta

de las quebradas Popales y Manila, también de Puerto Calavera, La Po, El Aporriado y Marmajón. Adicionalmente, el acueducto cuenta con una planta de tratamiento de potabilización en el sector Campo Alegre.

La empresa prestadora del servicio de acueducto en el casco urbano es Ingeniería Total, sus redes cubren un 65% de la población (DANE, 2005), pero presenta interrupciones así que la comunidad almacena agua en tanques, disminuyendo así la calidad con la que se distribuye. La población restante capta agua para su consumo desde pozos o quebradas. Debido a la discontinuidad y cobertura mencionada, el acueducto realmente presta una cobertura del 30% (Alcaldía de Segovia, 2008).

La cobertura del servicio de alcantarillado es de 46,2% en el censo de 2005 (DANE, 2005), pero en 2007 el Plan de Desarrollo Municipal menciona una cobertura mucho menor: del 20% en la cabecera municipal. Con una red que combina aguas residuales con las pluviales en tuberías de concreto antiguo que en la actualidad presenta daños que han ocasionado fugas en los sótanos de algunas viviendas (Alcaldía de Segovia, 2008). En el sector rural, la mayoría de las viviendas vierten a quebradas como El Tigrito, El Matadero y La Paz.

Por otro lado, para la disposición de residuos sólidos, estimados en una generación promedio de 20,66 Toneladas/día, se cuenta con un relleno sanitario. El prestador del servicio pasó de ser el Municipio a la empresa Segovia Aseo, alcanzando así un 93,5% de cobertura a viviendas en la zona urbana, limitados por el difícil acceso por vías muy angostas y algunas en mal estado. En el sector rural, sólo se presta el servicio de recolección de residuos al corregimiento Fraguas, que aún no cuenta con un relleno sanitario donde disponerlos (Alcaldía de Segovia, 2008).

Respecto a los demás servicios domiciliarios, el Ministerio de Minas reporta en el segundo trimestre de 2015 al DNP que sólo el 21,8% de las viviendas cuentan con cobertura de Gas Natural, pero el 95,4% cuenta con energía eléctrica para el 2014; y el Ministerio de Tecnologías de Información y Comunicación registra tan sólo 6,8% de acceso a internet (DNP, 2015).

Aspectos Abióticos

Topografía

La topografía del municipio de Segovia se caracteriza por ser ondulada con altas pendientes y presenta alta aptitud foresta. Como se mencionó anteriormente, las altitudes pueden variar desde los 200 m.s.n.m. en su parte más baja, hasta los 800 m.s.n.m en su parte más alta. Según la Administración Municipal de Segovia de la Dirección de Agricultura, Minas y Medio Ambiente (DAMMA), identifican dos tipos de suelo de manera general: los suelos cuarzo-arcillosos, ácidos con pH entre 5 y 6, hidrofóbicos y altos contenidos de Hierro. Y los suelos bajos en nitrógeno con capa vegetal delgada (entre 10 y 20 cm) (DAMMA, 2008).



Figura 15. Paisaje de Segovia, Antioquia. Fuente: r3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016

Clima

La región en la que se encuentra localizado el municipio se caracteriza por un clima cálido tropical húmedo, con precipitaciones anuales de entre 2000 y 4000 mm y humedad relativa de 84% (Alcaldía de Segovia, 2008). La Temperatura promedio que presenta el territorio Segoviano se encuentra entre 24 y 32 °C (DAMMA, 2008).

Hidrología

La amplia red de drenaje del municipio dirige su flujo principalmente de sur a norte, está compuesta por tres zonas:

Tabla 4. Red de drenaje superficial en el municipio de Segovia. Adaptado de: (Alcaldía de Segovia, 2008).

Este	Ríos Tigüi, Tamar y las quebradas Amará, Champán y Chicamoque.
Centro	Ríos, Bagre, Pocuné, Cuturú, El pescado, Capitán y Doña Teresa. Esta última, en su paso por el caso urbano, es conocida como “La cianurada” y desemboca en el río bagre.
Oeste	Río Mata

Entre otras fuentes del recurso hídrico para Segovia, el principal y del que se alimenta el acueducto urbano son el río Pocuné y la quebrada Popales; adicionalmente, se encuentran quebradas pequeñas que, en su tránsito por el perímetro urbano, son receptoras de aguas residuales urbanas, estas son: Quebrada el Tigrito y La Paz; los afluentes de la primera son La Argelia, Caracol, Caño 13 de Mayo, El Tejar; y de la segunda: El Guamo, La Chumeca y La Reina (Alcaldía de Segovia, 2008).

Es de resaltar que la Alcaldía Municipal ha detectado hasta el 2008, 89 plantas de beneficio de oro que vierte sus residuos de cianuración a las fuentes hídricas mencionadas (Alcaldía de Segovia, 2008). De hecho, la DAMMA estima que se bombea un caudal de 500 L/s de agua contaminada por material particulado, alto pH, carga de minerales y compuestos orgánicos (DAMMA, 2008).

Aspectos Bióticos

El territorio del municipio de Segovia es uno de los últimos baluartes que hacen parte del Bosque del Nordeste en Antioquia, el cual es hábitat de gran variedad y cantidad de especies nativas tanto de fauna como de flora; esto lo convierte en un potencial forestal muy valorado para comercio de materia prima en ciudades como Medellín, Bogotá, Bucaramanga, Pereira,

Barrancabermeja, entre otras; sin embargo, actualmente no se está valorando su importancia ecosistémica (Alcaldía de Segovia - Antioquia, 2012). Adicionalmente, el municipio cuenta con parte de su terreno en la Reserva Forestal del Magdalena, el cual no se ha caracterizado y estudiado y, por tanto, el Plan de Desarrollo incluye esto como parte de sus objetivos en los proyectos a corto plazo.

Flora

Entre las especies relevantes que conforman la variedad forestal del municipio, están el Amargo, Abarco, Acite María, Arenillo, Coco Cabullo, Tamarindo, Guamo Rosado, Cargamanto Masábalo, Ceiba, Tolúa, Cagui (Alcaldía de Segovia - Antioquia, 2012).

Fauna

Las descripciones de este aspecto en los documentos municipales como el plan de desarrollo municipal y el plan básico de ordenamiento territorial, refieren la gran riqueza en bosques y fuentes hídricas, siendo el ambiente propicio para animales residentes y transitorios, entre los cuales se encuentran la Danta, el Venado sin cuernos, Oso Hormiguero, Tigrillo, Perro de monte, Oso perezoso, Nutria, Armadillo, Chigüiro, Ñeque, Guagua, Mapana Coral, Cazadora, Babilla, Iguana, Morrocoy, Tortuga, Rana venenosa, Gavilán, Aguija, Búho, Guacharaca, Colibrí, Guacamaya, Loro Frente roja, Loro frente amarilla, Carpintero, Turpial, Mochilero y Mico titi (Alcaldía de Segovia, 2008). Esos mismos documentos también reconocen que hay efectos antrópicos que están afectando fuertemente estas especies y en general el ambiente.

Contexto de la Minería de Oro en Segovia

Segovia es un municipio tradicionalmente minero con una producción estimada, según reportes oficiales, de más de 3000 Kg de oro y más de 1700 kg de plata por año (DAMMA, 2008). Por esto y las estadísticas oficiales, se afirma que la base de la economía de este municipio es la extracción de oro de forma artesanal y levemente tecnificada; actividad que se ha venido desarrollando a través de la historia, desde el descubrimiento de Tierradentro (como se llamó en ese entonces el municipio) a través de las primeras excursiones a la selva, época que en el momento se conoció como la “fiebre del oro”, trayendo consigo la llegada de esclavos durante el periodo colonial. Estos hitos desencadenaron un desarrollo minero masivo posterior con un crecimiento exponencial de la población (Mayorality of Segovia - Antioquia, 2012).



Figura 16. Mina subterránea y planta de beneficio involucrada en el proceso de extracción de oro en Segovia, Antioquia. Fuente: r3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.

La manera como se ha comenzado a desarrollar la explotación minera ha pasado de ser principalmente artesanal, con técnicas como el barequeo o mazamorreo, a levemente más tecnificada, por medio de maquinaria pesada y más invasiva; es así como, proporcionalmente se han aumentado los efectos dañinos ejercidos sobre los recursos naturales. Adicionalmente, la cantidad de sitios que explotan el mineral ha ido aumentando con el pasar de los años y se carece de un censo minero que cuente también la minería informal para llevar un control y seguimiento y así mismo poder requerir la reparación al medio ambiente.

Según el diagnóstico realizado por la DAMMA de Segovia, se identifican ciento veinte tres mil hectáreas aptas para la explotación de minería, sin embargo, el desarrollo de esta actividad se ha venido realizando de manera no sostenible, debido a la implementación de técnicas inapropiadas de alto impacto en los recursos naturales. Adicionalmente, mencionan que al 2008 se encuentran 150 minas de oro de explotación subterránea y sólo 10 unidades mineras se encuentran formalizadas (DAMMA, 2008). En contraste, por concepto de personas residentes y dedicadas al tema en el municipio, se encuentra que existe una monopolización de títulos mineros en Segovia, donde la empresa minera Colombia Gold es la única que cuenta con título Minero.

Los problemas que la Alcaldía Municipal de Segovia identifica al respecto, son principalmente la presencia y extensión de la minería urbana especialmente en barrios como Alto de los Patios, El Hueso y El Paraíso, la invasión a títulos mineros otorgados por parte de minería informal, poca diversificación de la economía que, como se mencionó está enfocado casi únicamente en la minería, ocasionando escasez de empleos, desarrollo y productividad; también se presenta falta de apoyo por parte de entidades técnicas y jurídicas para la formalización de la minería e inexistencia de valor agregado en la cadena productiva del oro debido a la falta de capacitación en joyería y empresas joyeras, además de la reducida inversión en tecnología y equipos (Alcaldía de Segovia, 2008).

Aun así, el tema de la regulación en cuanto a políticas y acciones de orden municipal es limitada teniendo en cuenta que la actividad minera ya está regulada por normas superiores como el Código de Minas y sus decretos reglamentarios, con entes departamentales y nacionales reguladores; una de las acciones implementadas, que hasta el momento ha dado resultados, fue la creación de una Unidad Minero Ambiental del municipio, con el objetivo de apoyar, promocionar y regular los entables mineros de la pequeña y mediana minería por parte de las autoridades ambientales y de fomento minero (Alcaldía Municipal de Segovia, 2002 - 2011). Adicional a la insuficiencia de apoyo técnico a la minería informal, también se carece de inversión, como se mencionó previamente.

Finalmente, según el oficio de diagnóstico de salud, enviado a la Secretaría de Planeación de Segovia, es inminente la presencia de niveles de contaminación por mercurio en muestras de orina de la población, convirtiéndolo en una problemática de salud pública. Las estadísticas mencionan que un 80% de la muestra de población presenta niveles de intoxicación y el 20% restante corresponde a personas contaminadas con niveles muy cercanos a sobrepasar el límite permisible (Alcaldía de Segovia, 2008).

Estrategia de Muestreo Sitio 1

La estrategia de muestreo propuesta está basada en los siguientes criterios, los cuales se alinean con los objetivos del estudio: sitios donde se han llevado a cabo actividades mineras

en el pasado o son actualmente realizadas, sitios donde se ejecuten actividades de minería artesanal, que el dueño del predio o la comunidad circundante estén interesados en la recuperación del sitio y/o que la comunidad esté siendo afectada por el uso previo o actual del sitio. La selección del sitio fue celebrada en conjunto con los representantes del gobierno municipal, pertenecientes a la Dirección de Agricultura, Minas y Medio Ambiente - DAMMA.

De acuerdo con lo anterior, se ubicaron dos sitios a visitar para realizar el muestreo: el primero, correspondía a una mina actualmente explotada, donde se tomaron tres muestras; y el segundo sitio, un entable minero donde las personas que extraen el mineral, lo procesan con la maquinaria del lugar. En la Figura 17 se presenta la distribución de los 6 puntos de muestreo en total que se tomaron.

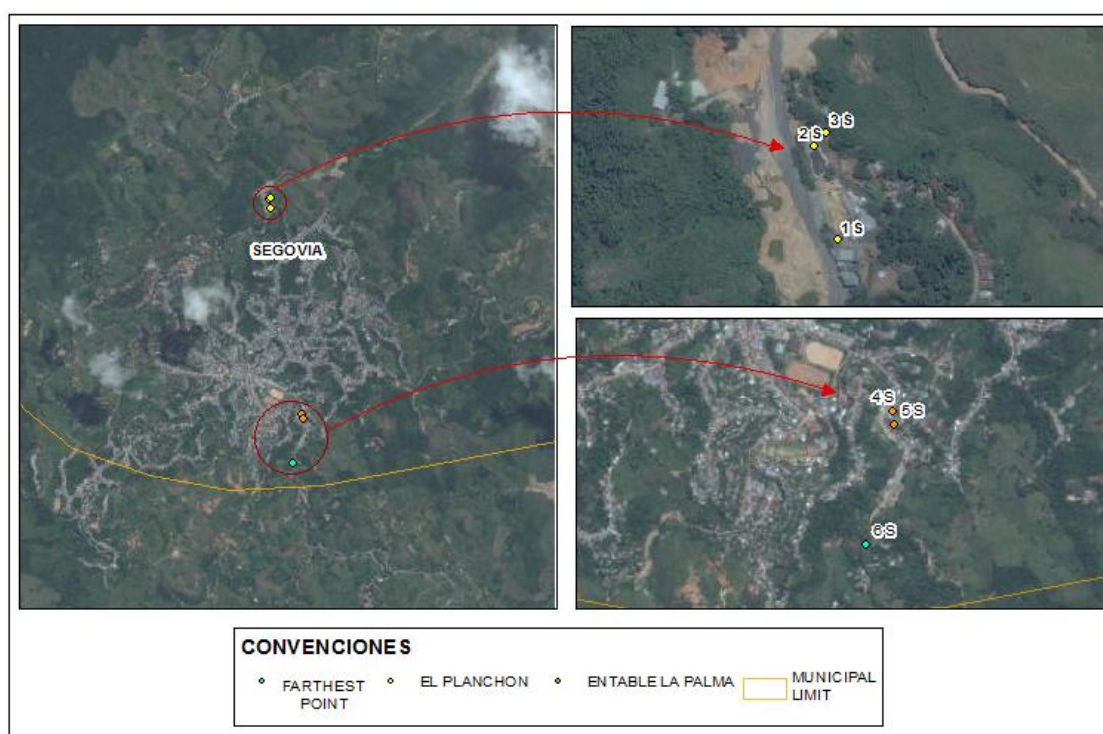


Figura 17. Distribución de puntos de muestreo en el área urbana de Segovia, Antioquia. Fuente: Ecodes Ingeniería S.A.S, 2016.

Detalles de las Muestras

En seguida (ver Tabla 5), se presenta la información detallada de cada punto de muestreo, indicando el código con el que figura la muestra, su georreferenciación, descripción y registro fotográfico, en el que se resaltan factores de importancia.

Tabla 5. Información detallada de los puntos de muestreo del municipio de Segovia, Antioquia. Fuente: R3 Environmental Technology Colombia S.A.S, 2016.

Código	Georreferenciación		Descripción	Registro Fotográfico
	N	E		
1 S	7,09117	-74,7019	Esta muestra fue tomada en suelo seco sin cobertura vegetal. Está localizado cerca de la planta de beneficio donde el oro, obtenido de la mina El Planchón, es procesado.	 Planta de Beneficio Muestra 1S
2 S	7,09185	-74,7021	La segunda muestra en Segovia fue tomada en suelo seco sin cobertura vegetal, cerca de una quebrada aguas abajo de la planta de procesamiento de oro El Planchón. A pesar que no es visible en la foto, una piscina de cianuro, también se encuentra cerca al punto muestreado, una piscina en la que contiene aguas con cianuro y mercurio.	 Quebrada Muestra 2S
3 S	7,09195	-74,7020	La última muestra tomada en El Planchón es la 3S, atravesando la quebrada, aguas abajo de la planta de procesamiento, muy cerca de las viviendas circundantes.	 Muestra 3S Hogares

Código	Georreferenciación		Descripción	Registro Fotográfico
	N	E		
4 S	7,07552	-74,6996	Dentro de la planta procesadora (entable) de La Palma, se almacenan tierras emergentes como subproducto de la planta. Sobre esta pila, se tomó la muestra sólida seca.	
5 S	7,07515	-74,6995	La cuarta muestra de Segovia fue tomada en la parte trasera de la planta de procesamiento de oro de La Palma, que a la vez colinda con casas de pobladores. La muestra se recolectó de suelo seco, retirando la vegetación plantada en el punto seleccionado cerca de árboles.	
6 S	7,07183	-74,7003	La última muestra tomada en Segovia (6S) corresponde a un lugar remoto que entra en el área rural del municipio, en la subida de una montaña por un pequeño camino peatonal. Es suelo seco bajo vegetación natural.	

Descripción Sitio 2: Tadó, Choco

Tadó fue fundado el 19 de marzo de 1740 (Palacios Murillo & Rengifo Arias, 2014) y se encuentra localizado al nororiente del departamento del Chocó, Colombia; a 68 Km de distancia de la capital del departamento, Quibdó (Aguilimpia Caicedo, 2012). Sus

coordenadas geográficas de ubicación son 76°73'10" de Latitud Norte y 5°16'10" de longitud Oeste, sobre los 75 metros sobre el nivel del mar (altitud promedio). La Figura 18 muestra la localización del municipio a nivel nacional y departamental.

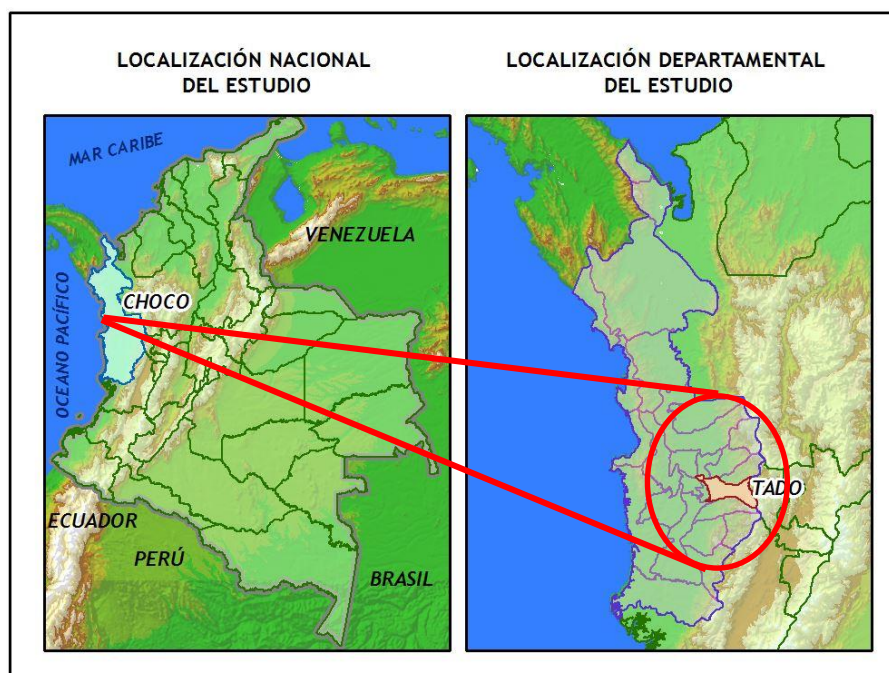


Figura 18. Localización de San José de Tadó (Tadó). Fuente: R3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.

El municipio en su área urbana está compuesto 13 barrios y la zona rural del municipio está conformada por 11 corregimientos y 12 veredas en territorios colectivos de comunidad negra representados en consejos comunitarios, administrado por un consejo mayor ASOCASAN, caracterizados por ser asentamientos poblacionales (Agualimpia Caicedo, 2012).

La vía Transversal Central del Pacífico es la vía terrestre principal que conecta con Tadó (Figura 19). Adicionalmente, a nivel regional, cuenta con tres vías: Vía Playa de Oro – Carmelo que comunica a Tadó con Bagadó, Vía Tapón – Campo Alegre que comunica con el municipio Río Iró y Vía Pueblo Viejo – Manungará (Palacios Murillo & Rengifo Arias, 2014).



Figura 19. Acceso principal por carretera a Tadó. Fuente: R3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.

El acceso aéreo directamente al municipio no es posible, dado que no cuenta con aeropuerto; pero el más cercano es el de la ciudad de Quibdó. Finalmente, por vía fluvial, el principal río

navegable es el río San Juan, seguido por el Mungarrá, Chato y Tadocito (Agualimpia Caicedo, 2012).

Economía y Productividad

La producción agrícola y la minería son los dos pilares de la economía en el municipio de Tadó. Dentro de la primera actividad, predominan los cultivos de frutas como plátano, chontaduro, borojó, piña, yuca, banano, caña, marañón, lulo anón, cacao, papaya, mil pesos y de maderables como guasca, carbonero, caucho, chano, laurel, trúntago y guayacán (Agualimpia Caicedo, 2012). Por otro lado, el comercio es la actividad más frecuente a la que se dedican los habitantes de Tadó; de hecho, según el DANE, un 60,7% de los establecimientos se dedican al comercio; mientras que el 10,3% son de industria, 26,6% de servicios y 2,3% se dedican a otra actividad (DANE, 2005).

Los principales generadores de empleo formal para los Tadoses son las entidades estatales, el hospital San José de Tadó y otras empresas prestadoras de salud. Aun así, se presenta una tasa de desempleo del 42%, 24% de informalidad y una recurrencia del 6% de menores de 15 años vinculados a actividades laborales (Agualimpia Caicedo, 2012).



Figura 20. Zona comercial de Tadó. Fuente: R3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.

Amenazas y Riesgos

Como en los demás municipios de Chocó, se han identificado riesgos naturales causados por las características geológicas, distribución orográfica y el régimen climático. Dentro de estos riesgos, cabe mencionar los deslizamientos debidos a la constitución geológica, la intensidad y régimen pluviométrico, fuertes pendientes, zonas sin cobertura vegetal y explotaciones mineras según el Esquema de Ordenamiento Territorial – EOT; siendo estas últimas una de las bases más fuerte de la economía del municipio y la carencia de protección en taludes.

Los terremotos son otro riesgo natural presente a nivel nacional debido a que se ubica sobre tres placas tectónicas principales (Nazca, Sur América y Caribe); pero especialmente la zona occidental del país es considerada de alta sismicidad y por tanto es una amenaza relevante para el municipio (Palacios Perea, 2000).

Finalmente, las inundaciones son identificadas en el EOT de Tadó como un fenómeno de ocurrencia periódica a nivel departamental, debido principalmente al régimen climático y su aumento en intensidad, duración y frecuencia de las lluvias; agregando el hecho de que los ríos San Juan y Atrato son considerados como torrenciales en la porción de descenso y piedemonte de la cordillera; sin embargo, en este aspecto, la ubicación de Tadó favorece la

disminución de ocurrencia de este fenómeno, salvo el barrio San Pedro (Palacios Perea, 2000).



Figura 21. Río San Juan. Tadó. Fuente: R3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.

Entre otros riesgos y amenazas identificados, están los de origen antrópico, como la deforestación, incendios a causa de estaciones de servicio surtidores de combustible en zonas residenciales y el aumento de carga sedimentaria en las corrientes de agua (Palacios Perea, 2000).

Aspectos Sociales

Demografía

Según el Censo del DANE realizado en el 2005, del total de la población de Tadó el 48,3% son hombres y el 51,7% mujeres como se evidencia en la Figura 22. El 64,03% de la población reside en la zona urbana, mientras que el 35,97% pueblan el área rural del municipio (Agualimpia Caicedo, 2012). También en la Figura 22, se evidencia alta natalidad y migración de la población mayor a 24 años.

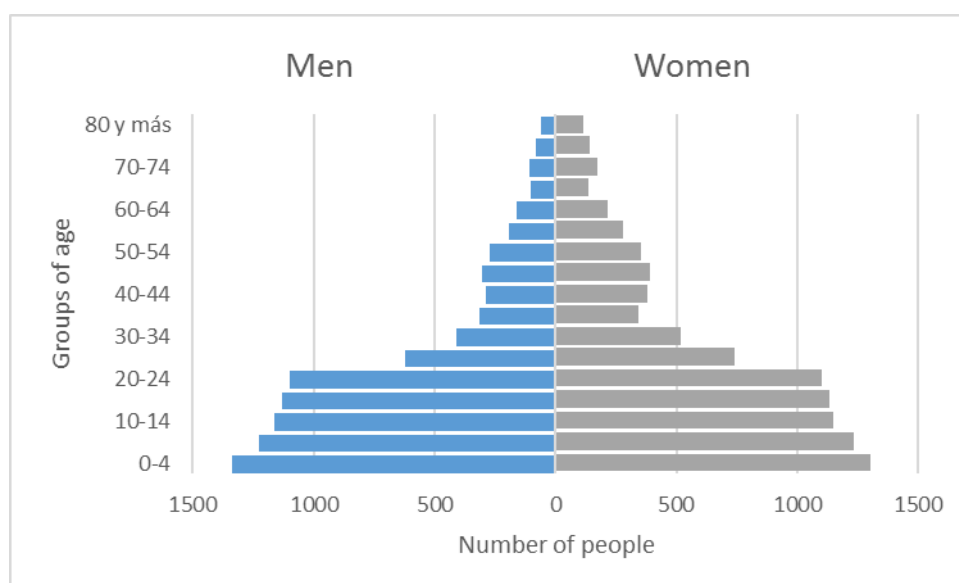


Figura 22. Distribución de la población de Tadó según edad y sexo. Fuente: (DANE, 2005)

La distribución ilustrada en la Figura 22 se mantiene para los datos colectados y reportados por el DANE en 2015 al Departamento Nacional de Planeación -DNP-, en sus Fichas Municipales (DNP, 2016). El total de la población en este reporte es de 18906 personas, representando un 3,8% de la población total departamental, en la que se presenta una relación cercana a uno a uno entre hombres y mujeres.

Como característica adicional, se puede definir a la población del municipio estadísticamente repartida en tres grupos étnicos: población indígena en 8,34%, negros, mulatos o afrocolombianos en 70,8% y solo una persona se identifica como población raizal (DNP, 2016). Por último, la ANSPE (Agencia Nacional para la Superación de la Pobreza Extrema) en 2015 reporta al Departamento Nacional de Planeación un total de 3768 pobladores vinculados al programa RED UNIDOS del gobierno, tomando esto como indicador de familias en situación de extrema pobreza y/o desplazamiento.

Calidad de Vida

El índice NBI (Necesidades Básicas Insatisfechas) determina, con base en indicadores simples (como viviendas inadecuadas, hacinamiento crítico, servicios inadecuados, alta dependencia económica, inasistencia escolar o analfabetismo), la cantidad de necesidades básicas de la población que no se encuentran cubiertas (DANE, 2016). Siguiendo esta definición, la estadística para este indicador es elevada, con un 89.30% en el sector urbano y el 82.43% para el sector rural, para un promedio de 86.86% de NBI en el municipio en junio de 2011 (Agualimpia Caicedo, 2012), reflejando así la carencia de políticas de inversión tendientes mejoramiento de calidad de vida de sus habitantes.

Conflicto Armado

La ubicación geográfica del Municipio de San José de Tadó juega un papel importante para el desarrollo económico del Chocó y el eje cafetero; por tal motivo, los grupos al margen de la ley, en su propósito de controlar este territorio, han propiciado la intimidación en las comunidades del municipio, tales como enfrentamientos entre ellos, asesinatos selectivos de líderes comunitarios y miembros de la población y desplazamiento forzado de las comunidades (Agualimpia Caicedo, 2012). Hoy en día, ese problema se ha reducido y Tadó es ahora considerado una zona segura.

Aspectos de Agua Potable y Saneamiento Básico

Según el DANE, en 2005 la población de San José de Tadó no cuenta con el servicio de Gas Natural, el 13,1% de los habitantes cuentan con servicio de alcantarillado, el manejo de aguas residuales mediante alcantarillado se presta al 16,2% de viviendas y la telefonía es un servicio que sólo el 20,9% de la población tiene acceso. El 81,2% de las viviendas tiene conexión a Energía Eléctrica (Agualimpia Caicedo, 2012), siendo este el servicio de mayor cobertura para el año del censo.

El EOT municipal identifica como problema en este aspecto la carencia de agua potable y alcantarillado en las casas de los pobladores, siendo un 90% la cantidad de centros poblados del sector rural que no dispone de dichos servicios básicos de saneamiento; y una contaminación a causa de los desechos sólidos y líquidos, dado que los residuos sólidos generados por la población (aproximadamente 10 toneladas en el año 2000) son dispuestos en su mayoría en los solares de las viviendas y las corrientes de agua (Palacios Perea, 2000).

Aspectos Abióticos

Topografía

El relieve que presenta el paisaje de Tadó es ligeramente ondulado, montañoso y presenta también valles planos (Agualimpia Caicedo, 2012). De esta manera, presenta dos formas de suelos: los de formas aluviales en las planicies del río Atrato con pendientes menores a 3%, formados a partir de material sedimentario, fertilidad baja, superficiales y mal drenaje. Y suelos de las colinas, conformado por unidades de paisaje de relieves ondulados a fuertemente ondulados y pendientes de 25%, ubicados en la faja pluvial principalmente desarrollados a partir de material sedimentario, superficiales, de baja evolución, bien drenados y de fertilidad muy baja. Finalmente, Tadó está ubicado geológicamente en la cuenca de los ríos Atrato y San Juan, a la vez que se encuentra en la vertiente occidental de la cordillera occidental (Palacios Perea, 2000).



Figura 23. Paisaje de Tadó. Fuente: R3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.

Clima

El clima que predomina en el municipio es cálido húmedo, el característico tropical, con oscilaciones de temperatura anuales muy pequeñas y una temperatura que oscila diariamente entre los 26 y 29 °C, para un promedio de 28 °C. También es característica de la zona, su alta pluviosidad que oscila entre los 6800 a 7600 mm anuales (Palacios Perea, 2000). Presenta dos periodos invernales: el primero entre abril y junio y el segundo entre septiembre y noviembre, conformando un régimen bimodal para el municipio. Otras características meteorológicas que conforman el clima de Tadó se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Factores meteorológicos característicos del clima en Tadó, Choco. Fuente: Adaptado de (Palacios Murillo & Rengifo Arias, 2014)

Parámetro Meteorológico	Rango	
	Desde	Hasta
Velocidad del viento (en dirección predominante hacia el Este)	9 Km/h	28 Km/h
Brillo Solar	0,7 h/día	9 h/día
Humedad Relativa	90%	95%

Hidrología

El sistema Hidrográfico del municipio de Tadó está constituido por dos grandes cuencas: la del río San Juan y la del río Atrato. La primera se extiende en 180 Km sobre su corriente principal, con un ancho de cuenca de 80 Km en el occidente de la cordillera occidental; además, comprende ríos como Tadocito, Mungarrá, Guarato, Chato, Profundó, Iró, Condotó, Tamaná, Cajón, Sipí, Currucupí, Capomá, Munguidó y Calima; siendo estos afluentes de gran caudal y altas pendientes, aumentando así el caudal del río San Juan y de esta manera se conforma como el más caudaloso de los tributarios de la vertiente del pacífico, con 2721 m³/s (Palacios Perea, 2000).

La corriente principal de la segunda cuenca (Río Atrato) es uno de los principales ríos de Colombia, con una extensión de 24710 Km, en los que recoge aguas de varias corrientes, entre las cuales se encuentran Hábita, Riogrande, El Toro, Girardot, y la Playa en el municipio del Carmen. Entre ellos, se encuentra también la microcuenca del río Quito, que comprende el municipio de Tadó (Palacios Perea, 2000).

Aspectos Bióticos

Popularmente se conoce el bosque pluvial del pacífico como uno de los ecosistemas de mayor biodiversidad (Agualimpia Caicedo, 2012), sin embargo, la intervención antrópica sobre los bosques de la zona y la presión con que esta se ejerce y se ha ejercido por varios años, sólo permite el uso de estas zonas para desarrollo de bosques secundarios; además, varias especies endémicas que harían parte de este ecosistema, se encuentran seriamente amenazadas, debido a la rápida destrucción de sus hábitats (Palacios Perea, 2000).

Flora

Tadó presenta abundante y variada vegetación, entre las cuales se encuentran especies maderables como Guasca, Carbonero, Caucho, Chanu, Laurel y Trúntago (Palacios Murillo & Rengifo Arias, 2014). Adicionalmente, se presenta abundancia en especies como Mora, Anime, Chachajo, Canime, Chanu, Algarrobo, Otobo, Volador, Botejo, Carrá, Mojao, Aceite María, Balsino, Lechero, Cuangare, Carra, Machare, Caimito, Guamo, Jigua y muchas palmas (Palacios Perea, 2000).

De manera general, predominan los bosques de aluviones y coluviones antiguos con diferentes grados de disección (Agualimpia Caicedo, 2012). Entre las asociaciones que conforman la vegetación del municipio, se encuentran bosques con tendencias a heterogeneidad en especie y variación en tamaño y altura, bosques de colinas con relieves fuertes y bosques muy heterogéneos (Palacios Perea, 2000).

Fauna

El municipio de Tadó y en general el departamento de Chocó es conocido por su amplia riqueza de fauna y grandes selvas que les sirven de hábitat; en su gran mayoría son especies endémicas. En la Tabla 7 se mencionan las especies conocidas.

Tabla 7. Especies conocidas en Tadó. Fuente: Adaptado de (Palacios Perea, EOT Tadó, 2000)

Tipo	Especies Conocidas
Mamíferos	Tigre o Jaguar, Ocelote o Tigrillo, Gato solo o Gato montés, Chucha, Oso "Rabo de caballo", Oso Hormiguero y Danta.

Tipo	Especies Conocidas
Anfibios	Babilla y tortugas; además, entre los oficios, están la Berrugosa Chocoana, Equis rabo de Chucha, Equis, Veinticuatro Chocoana y una gran variedad de corales.
Peces	Sabaleta, Sábalo, Nicuro, Mojaras y Barbudos.

Especialmente en lo que respecta a la diversidad ictiológica, se han encontrado 63 especies endémicas dulceacuícolas existentes en el Chocó, de un total de 186; entre las cuales, 15 se encuentran en alta amenaza (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, Universidad de Manizales, WWF Colombia, 2013). Según el EOT municipal, una importante razón para esta alarma principalmente notoria en especies acuícolas es la contaminación mercurial, atribuida en el mismo documento a los procesos extractivos de la minería ilegal (Palacios Perea, 2000).

Contexto de la Minería de Oro en Tadó

Tadó, así como otros municipios ubicados en la región, presentan gran riqueza en minerales dados sus aluviones auroplatiníferos, ubicados en la cuenca del río San Juan y sus afluentes, aunque también se extrae representativamente minerales como el cobre, carbón, plomo, zinc y petróleo (Palacios Perea, 2000). La manera en que se explotaba este recurso en la zona era artesanal, es decir por medio de tecnologías propias o etnotecnologías, como el barequeo o mazamorreo (Figura 24), que mueve pequeños volúmenes de gravas auríferas, lo que podría facilitar la asimilación y resiliencia natural de las diferentes matrices afectadas del ambiente; al contrario de la maquinaria pesada y nuevas tecnologías que fueron llegando al departamento a través del desarrollo minero y la llegada de medianos y grandes empresarios. Adicional a la presión ejercida por las ventajas productivas y extractivas de las tecnologías, se une el alza de los precios del oro en la última década, ha ejercido una nueva presión que intensificó la actividad extractiva de este mineral, implementando el uso del mercurio para la amalgamación y disminución de pérdidas (Medina Mosquera, Ayala Mosquera, & Perea, 2011).



Figura 24. La gente del común tratando de extraer oro en sitios abandonados. Fuente: R3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.

Dada la definición del término Minería Ilegal, en el que figura cualquier trabajo de exploración, extracción o captación de minerales de propiedad nacional o privada sin el correspondiente título minero o autorización del titular que le conceda dichos derechos, la minería artesanal ha venido constituyendo una parte de este término por las condiciones en que se realiza. En Tadó, se reconoce a la minería artesanal, también conocida como de subsistencia, como no registrada; de la misma manera ilegal, se han venido desarrollando la mayoría de las

exploraciones y explotaciones medianas a cielo abierto (Palacios Perea, 2000). Estas actividades han causado delitos ambientales, desplazamientos forzados, homicidios, trabajo infantil, entre otras conductas ilícitas (Palacios Murillo & Rengifo Arias, 2014).

Al respecto, las entidades competentes en el municipio se han comprometido, mediante la formulación del Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental de la Minería, con gestiones y reglamentaciones para disminuir los impactos y la ilegalidad; así como aumentar la sostenibilidad, responsabilidad para posterior retro-llenado y recuperación de suelos, registro de explotación y con esto, lograr el acrecentamiento de las regalías, empleo formal y ganancias para la población de Tadó (Agualimpia Caicedo, 2012). Aun así, la población se ha manifestado insatisfecha, argumentando que la gestión de formalización y legalización de la actividad minera ignora el reconocimiento y remediación de las consecuencias que hasta el momento han evidenciado, resaltando a la vez que “la cuenca del río Atrato atraviesa por una notable crisis en materia socio-ambiental”, exigiendo se den soluciones perdurables que permitan proteger los derechos de la población en alto riesgo (Tutela por violación de los artículos 1, 2, 7, 11, 13, 44, 49, 366 de la Constitución Política de Colombia, y la vulneración de los derechos fundamentales a la vida, a la salud, al agua, a la alimentación y al territorio., 2015).

Estrategia de Muestreo en el Sitio 2

La estrategia de muestreo se estructuró tomando en cuenta la selección de un área abandonada con previa extracción de oro (hace aproximadamente 8 años). Este sitio está situado en la zona rural de Tadó y cubre un área de casi 1 Km².

La Figura 25 muestra la distribución de los puntos de recolección de muestra. Se tomaron un total de seis (6) muestras, cuatro (4) de las cuales se localizaron en áreas representativas del sitio y dos (2), cerca de las viviendas de los habitantes de la zona.



Figura 25. Distribución de puntos de muestreo. Zona rural de Tadó. Fuente: R3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.

Detalles de las Muestras

La Tabla 8 presenta una descripción detallada de cada punto muestreado.

Tabla 8. Información detallada de los puntos de muestreo. Fuente: R3 Environmental Technology Colombia SAS, 2016.

Código	Georreferenciación		Descripción	Registro Fotográfico
	N	E		
1T	5,2226	-76,6526	Esta muestra fue tomada en suelo seco con poca cobertura vegetal y cercano a reservas de agua (pequeños lagos) usadas para la extracción de oro.	
2T	5,2219	-76,6525	La muestra 2T fue tomada en suelo seco en un área donde se observó vegetación nueva de especies nativas después del abandono de la mina (hace 8 años).	
3T	5,2212	-76,6516	Esta muestra fue tomada en suelo seco con poca cobertura vegetal y sin mayores especificaciones.	
4T	5,2198	-76,6508	Esta muestra fue tomada en suelo seco en un área donde se estuvo desarrollando hace 5 años un programa de reforestación con la especie "Acacia mangium".	

Código	Georreferenciación		Descripción	Registro Fotográfico
	N	E		
5T	5,2239	-76,6462	La muestra 5T fue tomada en la frontera entre la zona minera abandonada y algunas viviendas del área rural de Tadó.	
6T	5,2218	-76,6431	La última muestra de Tadó (6T) fue tomada en suelo seco en el límite entre la zona minera abandonada y algunos jardines de las viviendas del área rural de Tadó.	

Anexo 2: Detalles de pruebas de lixiviación y resultados

Objetivos

Los objetivos de esta parte del proyecto, fueron los siguientes:

- Evaluar las concentraciones de mercurio lixiviable y otros metales en muestras de suelo tomadas de dos sitios de la mina en Segovia.
- Evaluar las concentraciones totales de mercurio y otros metales en muestras de suelo tomadas de los mismos dos lugares de Segovia.
- Determinar la forma química (mercurio, lixiviable, enlace orgánico, metilmercurio, elemental o ligado a sulfuros) en el que el mercurio estaba dentro de la muestra de suelo más contaminada para el mercurio.
- Comprobar la capacidad de los productos C-Cure para reducir el riesgo de mercurio extraíble por lixiviación y ácido estomacal en la muestra de suelo más contaminada con mercurio.
- Comprobar la capacidad de los productos C-Cure para reducir la capacidad de lixiviación de metales pesados distintos del mercurio.

Toxicidad del Mercurio

La toxicidad del mercurio se relaciona con tres factores: (1) la toxicidad inherente del mercurio una vez que se ha incorporado a un organismo (2) la facilidad con que una forma específica de mercurio puede ser absorbida en un organismo y (3) la exposición de ese organismo a una forma específica de mercurio.

La toxicidad inherente del mercurio es bien entendida. Los trastornos neurológicos y del comportamiento pueden observarse tras la inhalación, la ingestión o la exposición dérmica de diferentes compuestos de mercurio. La inhalación de vapor de mercurio puede producir efectos nocivos en los sistemas nervioso, digestivo e inmunológico, pulmonar y urinario, y puede ser fatal. Una vez que se es expuesto al mercurio y esta ha ingresado al cuerpo por cualquier vía, los principales órganos objetivo para los efectos tóxicos del mercurio son el sistema nervioso central (SNC), el cerebro y los riñones. Los síntomas de la toxicidad del mercurio incluyen temblores, insomnio, pérdida de memoria, efectos neuromusculares, dolores de cabeza y disfunción cognitiva y motora. Las sales inorgánicas de mercurio son corrosivas para la piel, los ojos y el tracto gastrointestinal, y pueden inducir toxicidad renal si se ingieren. La exposición ocupacional prolongada y repetida a concentraciones de $20\mu\text{g m}^{-3}$ produjo efectos leves en el SNC y proporcionó la base para la concentración tolerable en el aire de $0.2\mu\text{g m}^{-3}$. La ingestión oral única o repetida de compuestos inorgánicos de mercurio se ha relacionado con la toxicidad renal en los casos humanos notificados. De forma similar, en ratas, la administración oral repetida de cloruro de mercurio durante seis meses resultó en daño renal con un nivel de efecto adverso no observado (NOAEL) de 0.16 mg kg^{-1} de peso corporal día^{-1} . El cerebro es el objetivo clave de los efectos tóxicos del metilmercurio ingerido. Estudios epidemiológicos indican que la neurotoxicidad del desarrollo puede ocurrir a dosis maternas del orden de $1\mu\text{g kg}^{-1}$ de peso corporal día^{-1} (UNEP, 2002).

Del mismo modo, la facilidad con que una forma específica de mercurio puede ser absorbido en un organismo y las vías por las que esto ocurre son bien comprendidas. Por ejemplo, el mercurio elemental es volátil y bien absorbido después de la inhalación, mientras que la

absorción de mercurio elemental después de la ingestión oral es extremadamente limitada (UNEP, 2002).

La exposición al mercurio una vez que se ha depositado en el medio ambiente es complicada. Las personas pueden estar expuestas al mercurio en cualquiera de sus formas bajo diferentes circunstancias. Sin embargo, la exposición se produce principalmente a través del consumo de pescado y mariscos contaminados con metilmercurio y por inhalación de los trabajadores de vapores elementales de mercurio durante los procesos industriales (UNEP, 2002).

Comportamiento del Mercurio en el Ambiente

Durante la extracción artesanal de oro, el mercurio metálico se mezcla con sedimentos y suelos que contienen oro, donde forma una amalgama con partículas de oro que están presentes en el suelo. La amalgama de mercurio de oro se separa del suelo por medio de la gravedad. Debido a que el mercurio tiene un punto de ebullición más bajo que el oro, el mercurio se puede hervir dejando atrás el oro puro. Como resultado de esta actividad, la minería aurífera artesanal y en pequeña escala crea la mayor entrada de mercurio en el medio ambiente, con emisiones anuales estimadas que van desde 800 a 1000 toneladas (Hinton *et al.*, 2002). Este mercurio (elemental) se deposita en el ambiente donde puede ser transformado en formas más tóxicas, como el mercurio inorgánico (Hg (II)). El mercurio inorgánico puede ser transformado por las bacterias en metilmercurio. El metilmercurio se bio-acumula fácilmente en los pescados y los mariscos. Si estos organismos son comidos por los peces depredadores, el mercurio bio-magnifica la cadena alimentaria (Díez, 2009; Wang *et al.*, 2013).

Sin embargo, la toxicidad y biodisponibilidad del mercurio depende también de sus interacciones dentro de la matriz de suelo o sedimento. Por ejemplo, si el suelo o el sedimento contienen materia orgánica y ligandos que contienen azufre, el mercurio podría unirse a estos materiales formando complejos que son menos móviles y por lo tanto menos tóxicos (Hintelman *et al.*, 1995). La adsorción a suelos, sedimentos y materiales húmicos es un mecanismo importante para la eliminación de Hg de la solución. La adsorción es dependiente del pH y aumenta a medida que el pH también lo hace. El mercurio también puede ser eliminado de la solución por co-precipitación con sulfuros. Bajo condiciones anaeróbicas, tanto las formas orgánicas como inorgánicas de Hg pueden convertirse en formas alquiladas por actividad microbiana, tal como por bacterias reductoras de azufre. El mercurio elemental también puede formarse bajo condiciones anaerobias por desmetilación de metilmercurio, o por reducción de Hg (II). Las condiciones ácidas (pH <4) también favorecen la formación de metilmercurio, mientras que los valores de pH más altos favorecen la precipitación de HgS, que es insoluble. En contraste, si el suelo es ácido, esto podría solubilizar el mercurio permitiendo que sea absorbido por los organismos. La Figura 26 representa un diagrama de las diferentes maneras en que el mercurio puede existir en el medio ambiente y una ilustración simplificada de sus riesgos asociados.

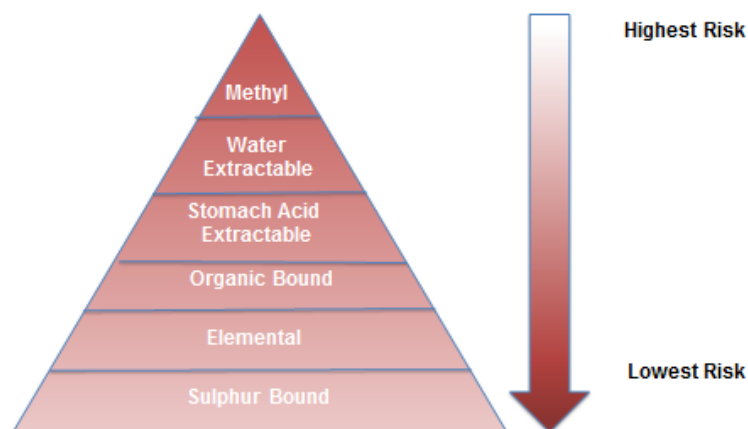


Figura 26. Formas mediante las cuales el mercurio puede estar presente en el medio ambiente y su riesgo asociado para los seres humanos y la vida silvestre

La fito-disponibilidad y la toxicidad del mercurio en los sistemas suelo-planta depende de su forma y adsorción al suelo con sales simples y mercurio elemental, causando el mayor peligro debido al potencial de generar vapores tóxicos. Las plantas difieren en su capacidad de absorber mercurio y pueden desarrollar una tolerancia a altas concentraciones en sitios contaminados, con concentraciones elevadas correspondientes en partes comestibles en comparación con suelos naturales (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007).

Varios estudios han informado de la acumulación de mercurio en las raíces de las plantas, aunque la translocación dentro de la planta a otras partes incluyendo los brotes y las semillas también ocurrirá (Hussein *et al.*, 2007; Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007).

Estándares de calidad ambiental para el mercurio y otros metales pesados

Para evaluar los riesgos asociados con el suelo contaminado, hay una serie de Estándares o normas Internacionales de Calidad Ambiental (EQS, por sus siglas en inglés) en uso que utilizan una variedad de criterios para determinar si los niveles de metales pesados encontrados en el suelo suponen un riesgo aceptable para los seres humanos y el medio ambiente.

Valores Guía del Suelo (SGV)

Los Valores Guía del Suelo (SGV) y las notas de orientación técnicas de apoyo están destinados a ayudar a los profesionales en la evaluación del riesgo a largo plazo para la salud de la exposición humana a la contaminación química del suelo (EA, 2009).

Existen diferentes SGV según el uso de la tierra (residencial, asignaciones, comercial) debido a que las personas usan el suelo de manera diferente y esto afecta a quién y cómo la gente puede estar expuesta a la contaminación del suelo.

Los SGV son "valores de referencia" para la detección y descarte de zonas de bajo riesgo de contaminación de la tierra. Estos dan una indicación de los niveles medios representativos de los productos químicos en el suelo por debajo de los cuales los riesgos para la salud a largo plazo es probable que sea mínima. Superar un SGV no significa que la remediación sea

siempre necesaria, sino que debe desencadenar investigaciones adicionales y una evaluación adicional del riesgo que un determinado contaminante podría plantear. Los valores de SGV se expresan como concentración total por kg de suelo [mg / kg] y por lo tanto no toman en cuenta la movilidad o biodisponibilidad de un elemento dado. La movilidad de metales pesados (y por lo tanto el riesgo que representan para la salud humana) depende en gran medida de factores ambientales, incluyendo el tipo de suelo y el pH del mismo.

Tabla 9. Valores Guía del Suelo del Reino Unido para 7 diferentes metales pesados. Tenga en cuenta que los valores de SGV se basan en los valores CLEA 2009 (Contaminated Land Exposure Assessment), que son documentos técnicos actualizados emitidos por la agencia Ambiental. Sustituyen los valores CLEA2002 e ICRCL (Comité Interdepartamental para la Reurbanización/redesarrollo de Tierras Contaminadas) para la evaluación del riesgo para la salud humana derivado de la contaminación de la tierra. Para el plomo (Pb) y el cromo (Cr) no se publicaron actualizaciones en 2009 por lo que las pautas mostradas son de CLEA 2002.

Metal Pesado	Uso del Suelo	CLEA Suelo SGV [mg/kg]
Arsénico (As)	Residencial	32
	Cultivos	43
	Comercial	640
Cadmio (Cd)	Residencial	10
	Cultivos	1.8
	Comercial	230
Cromo (Cr)	Residencial	130
	Cultivos	200
	Comercial	5000
Mercurio (Hg)	Residencial	10
	Cultivos	26
	Comercial	26
Níquel (Ni)	Residencial	130
	Cultivos	230
	Comercial	1800
Selenio (Se)	Residencial	350
	Cultivos	120
	Comercial	1300
Plomo (Pb)	Residencial	450
	Cultivos	450
	Comercial	750

Los valores de SGV sólo están disponibles para algunos contaminantes incluyendo Arsénico, Cadmio, Cromo, Mercurio, Níquel y Plomo (Tabla 9).

La directiva de lodos residuales (Directiva EC 86/278/EEC)

La Directiva de Lodos Residuales (Directiva EC 86/278/EEC) fue creada para fomentar el uso de lodos residuales en la agricultura y regular su uso de tal manera que se eviten los efectos nocivos de los contaminantes en el suelo, la vegetación, los animales y el hombre. Como tal, la directiva establece valores orientativos ambientales sobre concentraciones de metales en suelos agrícolas que se consideran aceptables después de la aplicación de lodos residuales. Aceptable, lo que significa que esas concentraciones se supone que no tienen ningún efecto

negativo sobre la salud humana como consecuencia del consumo de productos cultivados en tierras "contaminadas". A diferencia de los SGV (Tabla 9), la Directiva de Lodos de Aguas Residuales toma en cuenta el pH del suelo de algunos metales pesados (níquel, cobre y zinc) reconociendo que estos metales pesados son en general más móviles a pH más bajo, es decir en suelos ácidos. Al igual que con los SGV, los valores de la Directiva de Lodos Residuales se expresan como concentraciones totales de metal (Tabla 10).

Tabla 10. Concentraciones máximas de metales pesados en suelos agrícolas que difieren en la acidez según la Directiva EC 86/278/EEC y después de la aplicación de lodos residuales.

Elemento	pH del Suelo			
	5.0 – 5.4	5.5 – 5.9	6.0 – 7.0	> 7.1
Arsénico [mg/kg]	50	50	50	50
Cadmio [mg/kg]	3	3	3	3
Cromo [mg/kg]	400	400	400	400
Mercurio [mg/kg]	1	1	1	1
Níquel [mg/kg]	50	60	75	110
Selenio [mg/kg]	3	3	3	3
Plomo [mg/kg]	300	300	300	300
Cobre [mg/kg]	80	100	135	200
Zinc [mg/kg]	200	250	300	450

Criterios de Aceptación de Residuos (WAC)

Los Criterios de Aceptación de Residuos (EA, 2010) fueron introducidos en el Reino Unido para asegurar que los residuos potencialmente peligrosos se eliminen de manera segura para que ya no represente un riesgo para los seres humanos y el medio ambiente. A diferencia de los Valores Guía de Suelo y la Directiva de Lodos de Aguas Residuales, que basan el riesgo en las "concentraciones totales de metales" combinadas con el uso del suelo o el pH del suelo, los Criterios de Aceptación de Residuos evalúan los riesgos que los materiales contaminados representan para el medio ambiente y su toxicidad inherente. Las concentraciones de contaminantes lixiviables en agua no están necesariamente correlacionadas con las "concentraciones totales" de contaminantes en los residuos, sino que dependen de la especiación del metal y la capacidad de los diferentes contaminantes para unirse a la matriz de suelo / residuos. Los WAC se han fijado como valores límite máximos que no deben sobrepasarse para permitir la caracterización de un flujo de residuos específico en tres clases de peligro diferentes, estas son: "Residuos inertes no peligrosos", "Residuos peligrosos estables no reactivos" y "Residuos peligrosos". Los residuos que caen en cada

clase, requieren diferentes niveles de contención y manejo; los residuos clasificados como residuos peligrosos requieren las medidas y el seguimiento más estrictos, mientras que los residuos clasificados como “inertes” requieren una contención, una gestión y un seguimiento mínimos.

Los WAC para las diferentes categorías de residuos se presentan en la Tabla 11. Los WAC se basan en un método de extracción de agua líquido:sólido (L / S 10) 1:10 (BS EN 12457) que proporciona una evaluación de las concentraciones lixiviables de metales y otros contaminantes.

Tabla 11. Criterios de aceptación de residuos del Reino Unido (WAC) para las concentraciones máximas de contaminantes dentro de los residuos sólidos basándose en los resultados de las pruebas de lixiviación a base de agua (mg / kg) derivadas de una extracción líquida a sólida (L / S = 10).

		A	B	C
Componente	Símbolo	Residuo Inerte [mg/kg]	Granular / estable, no reactivo peligroso [Residuo mg/kg]	Residuo peligroso [mg/kg]
Arsénico	As	0.5	2	25
Bario	Ba	20	100	300
Cadmio	Cd	0.04	1	5
Cromo Total	Cr _{total}	0.5	10	70
Cobre	Cu	2	50	100
Mercurio	Hg	0.01	0.2	2
Molibdeno	Mo	0.5	10	30
Níquel	Ni	0.4	10	40
Plomo	Pb	0.5	10	50
Antimonio	Sb	0.06	0.7	5
Selenio	Se	0.1	0.5	7
Zinc	Zn	4	50	200
Carbono Orgánico Disuelto (DOC)	DOC	500	800	1000

La Directiva Marco del Agua de la UE (WFD)

La Directiva marco de la UE sobre el agua, 2000/60 / CE (UE WFD) es el instrumento jurídico más importante en el ámbito del agua desarrollado por la UE para proteger las aguas superficiales de la contaminación. Los objetivos clave de la WFD son la protección general de la ecología acuática, la protección específica de hábitats únicos y valiosos, la protección de los recursos hídricos y la protección de las aguas para baño. El requisito central de la WFD es que el medio ambiente se proteja a un nivel alto en su totalidad. Por esta razón, un requisito general para la protección ecológica, y un estándar químico mínimo general de la calidad del agua, se introducen para cubrir todas las aguas superficiales. El buen estado ecológico se define en términos de la calidad de la comunidad biológica, las características hidrológicas y las características químicas de una masa de agua. Un buen estado químico requiere que la concentración de elementos potencialmente tóxicos esté por debajo de una concentración máxima establecida (Tabla 12). Esta concentración es para algunos elementos, como cobre

y zinc, dependiendo de la dureza del agua (Tabla 12). Incluso si un solo elemento está por encima de la concentración máxima permitida, esto significa que la calidad del agua de esa masa de agua no cumple las directrices de la UE sobre la WFD.

Tabla 12. Directiva marco del agua EQS de metales pesados en aguas superficiales. Los números representan concentraciones medias anuales, a menos que se denoten como MAC, que representan la concentración máxima anual de un metal en particular.

Metal	Dureza del Agua [mg CaCO ₃ /l]			
	0-50	50-100	100-250	>250
Al [µg/l]	100	100	100	100
As [µg/l]	50	50	50	50
Cd [µg/l]	0.25	0.25	0.25	0.25
Cd _{MAC} [µg/l]	1.5	1.5	1.5	1.5
Co [µg/l]	3	3	3	3
Cr(III) [µg/l]	4.7	4.7	4.7	4.7
Cr(VI) [µg/l]	3.4	3.4	3.4	3.4
Cu [µg/l]	1	6	10	28
Fe [µg/l]	1000	1000	1000	1000
Mercurio (Hg)	0.7	0.7	0.7	0.7
Mn [µg/l]	30	30	30	30
Mn _{MAC} [µg/l]	300	300	300	300
Pb [µg/l]	7.2	7.2	7.2	7.2
Ni [µg/l]	20	20	20	20
Zn [µg/l]	8	50	75	125

Evaluación de mercurio y otros metales pesados en las muestras de suelo

Muestreo y Almacenamiento de Muestras

Segovia es un municipio minero por tradición, con una producción estimada > 3000 kg de oro y >1.700 kg de plata al año (DAMMA, 2008). Se tomaron seis muestras allí y otras seis de Tadó, otro municipio con historia de minería de oro (Figura 27). El primer conjunto de seis

muestras fue tomado en un área donde la explotación minera estaba teniendo lugar; estas fueron marcadas como S1 a S6. El segundo conjunto de muestras fue tomado en un sitio donde se había aprovechado la minería y se había abandonado; estas muestras fueron marcadas como T1 a T6.



Figura 27. Ejemplo de muestra (S3) en Mina El Planchón. La muestra S3 se tomó aguas abajo de la planta de procesamiento de oro, muy cerca de las casas vecinas de la ciudad.

Una vez tomadas, cada muestra se colocó en dos bolsas de plástico que se almacenaron en una caja fría. Las muestras fueron enviadas al Reino Unido para análisis y pruebas, donde se mantuvieron en un frigorífico a $<4^{\circ}\text{C}$ antes de ser procesadas.

Extracción y Análisis de Metales Totales

Para cuantificar las concentraciones totales de metales pesados en las muestras de suelo, cada muestra de suelo fue primero secada al aire durante 10 días a 20°C en un desecador. Se utilizaron bajas temperaturas para evitar la pérdida de mercurio como resultado de la evaporación. Una vez secadas, cada muestra se molió finamente en un mortero hasta que la muestra se convirtió en un polvo fino y homogéneo. Se colocaron 1,5 gramos de cada muestra de suelo seco y molido en 14 ml de *Aqua Regia* (10,5 ml de HCl concentrado y 3,5 ml de HNO_3 concentrado). El suelo fue luego digerido en un horno microondas (Anton Paar Multiwave 3000) a 180°C durante 20 min. El extracto se hizo entonces a 50 ml con agua desionizada ultrapura antes de ser analizado con un analizador de doble vista ICP-OES (Thermo iCap 6500).

Extracción de metales lixiviables en agua

El análisis del contenido de Hg extraíble en agua se llevó a cabo determinando en primer lugar, el contenido de humedad de las muestras de suelo húmedo, desecando 50 g de cada muestra de suelo. El contenido de humedad del suelo se calculó entonces a partir de la pérdida de masa de la muestra después del secado. Las muestras de suelo húmedo se utilizaron para la extracción de agua mediante la adición de 2 ± 1 g de suelo de los diferentes sitios que fueron muestreados (1S-6S y 1T-6T) a un frasco de Sterilin de 30 ml a la que se añadió 20 ± 1 ml de agua desionizada. Las suspensiones del suelo se agitaron en un agitador rotatorio durante 24 horas antes de ser filtradas a través de un filtro de nylon de $0,45\ \mu\text{m}$, en un vial de Sterilin limpio de 30 ml. Las muestras filtradas se acidificaron para estabilizar el mercurio extraído mediante la adición de 100 μl de HNO_3 concentrado al 50% a 10 ml de cada

extracto acuoso. El extracto se hizo entonces a 50 ml antes de ser analizado con un analizador ICP-OES de doble vista (Thermo iCap 6500).

Extracción de Metil Mercurio

El análisis de la concentración de metil-mercurio en la muestra 4S se realizó por HPLC-AFS. Las muestras de suelo se secaron primero a $<37^{\circ}\text{C}$ y se trituraron antes del análisis. El suelo se extrajo luego, utilizando una mezcla de etanol / ácido clorhídrico y extracción asistida por ultrasonidos.

Extracción secuencial para determinar la especiación del mercurio

Una extracción secuencial de la muestra de suelo 4S se llevó a cabo utilizando los métodos descritos por Liu *et al.*, (2006) y Bloom *et al.*, (2003).

Mercurio extraíble con agua:

Para medir el Hg extraíble con agua, se colocaron $1 \pm 0,1$ g de la muestra de suelo 4S desecada / molida en un tubo de centrifuga de 50 ml. Al suelo, se añadieron 10 ml de agua desionizada; la suspensión de suelo obtenida, se agitó luego en un agitador rotatorio durante 24 horas antes de ser centrifugada a 3000 rpm durante 30 minutos. El sobrenadante, que contenía el mercurio extraíble con agua, se decantó en un vial de Sterilin de 30 ml. El precipitado residual se enjuagó con otros 10 ml de agua desionizada y, posteriormente, se invirtió a mano varias veces antes de ser centrifugado de nuevo a 3000 rpm durante 30 minutos. El sobrenadante se decantó en el vial de Sterilin de 30 ml que contenía el primer agente de extracción. La solución se filtró a continuación, a través de un filtro de nylon de $0,45\ \mu\text{m}$ para eliminar cualquier partícula.

Mercurio extraíble con ácido estomacal:

Para medir el Hg extraíble con ácido estomacal humano, el residuo en los tubos de centrifugación de las extracciones de agua, se extrajo con 10 ml de una solución de ácido acético 0,1 M + ácido clorhídrico 0,01 M. El proceso de extracción se repitió como se explicó previamente, por agitación, centrifugación, enjuague y decantación como se ha esbozado.

Extracción de mercurio unido a la materia orgánica del suelo:

Para medir el mercurio que está unido a la materia orgánica en el suelo, el residuo en los tubos de centrifuga de las extracciones de ácido estomacal humano se extrajo con 10 ml de una solución de KOH 1M. El proceso de extracción se llevó a cabo como se describe para el "mercurio extraíble con agua".

Extracción de mercurio elemental:

Para medir el Hg (Hg^0) elemental, se extrajo el residuo en los tubos de centrifugación de las extracciones de Hg unidas a materia orgánica con 10 ml de una solución de HNO_3 12M. El proceso de extracción se repitió como antes. Sin embargo, a diferencia del anterior procedimiento, se utilizaron 10 ml de agua desionizada para el paso de aclarado y se usó un filtro de fibra de vidrio de $0,45\ \mu\text{m}$ para eliminar la turbidez residual.

Extracción de sulfuro de mercurio:

Para cuantificar la cantidad de sulfuro de mercurio en la muestra, el residuo en los tubos de centrifugación que quedaron después de la extracción del Hg elemental se trató con *Aqua*

regia (10 ml de HCl concentrado y 3 ml de HNO₃ concentrado). El *Aqua regia* se pipeteó directamente en los tubos de centrífuga. La extracción de mercurio retenido en el residuo, se llevó a cabo durante un período de 24 horas agitando suavemente la suspensión y dejándola reposar con la tapa ligeramente tapada para evitar la acumulación de gases dentro del tubo. Después de 24 horas, las extracciones se diluyeron a 40 ml usando agua RO y luego, se filtraron a través de un filtro de fibra de vidrio de 0,45 µm para eliminar la materia en partículas.

Resultados

Concentraciones totales de mercurio y otros metales pesados en muestras tomadas de Segovia y Tadó

Todas las muestras tomadas del área donde se procesaba el suelo para la recuperación del oro (Muestras S1-S6) mostraron concentraciones elevadas de mercurio, siendo los niveles en las muestras S1, S2, S5 y S6 más de 10 mg Hg / kg de suelo, S3 60 mg Hg / Kg de suelo y S4 siendo 360 mg Hg / kg de suelo (Figura 28). De acuerdo con los Valores Guía del Suelo (SGV), los suelos que contienen concentración > 26 mg Hg / kg de suelo, se consideran inadecuados para cualquier uso, mientras que el suelo que contiene > 10mg Hg / kg de suelo, no debe usarse para construir viviendas (uso residencial). Por lo tanto, todas las muestras S (1 al 6) fallarían en el SGV para el uso residencial (Figura 28).

En contraste, las concentraciones totales de mercurio en las muestras tomadas de Tadó (muestras T1-T6), se encuentran entre 0,16 y 1,6 mg / kg (Figura 28). Estos valores están muy por debajo de los Valores Guía del Suelo (SGV) para uso residencial (SGV <10mg / kg) y comercial (SGV <26mg / kg). Sólo las muestras T1, T3 y T4 tuvieron concentraciones de mercurio que estuvieron por encima del valor de SGV para uso agrícola (SGV <1mg / kg) (Figura 28). De forma similar, ninguna de las muestras tomadas de Tadó fue contaminada con cantidades significativas de otros metales pesados (Tabla 13).

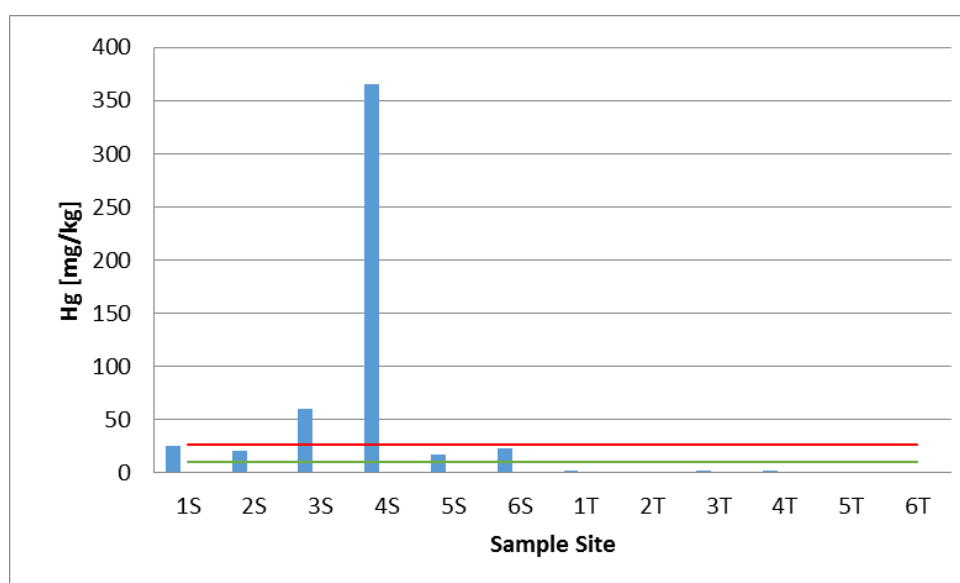


Figura 28. Concentraciones totales de mercurio (mg Hg / kg) en muestras tomadas de una zona minera activa (Muestras S1-S6) y una zona minera abandonada (Muestras T1-T6). Línea roja representa SGV para uso comercial y de adjudicación, la línea color ámbar representa SGV para Residencial

En contraste, las muestras S1, S2, S3, S4 y S5 también estaban contaminadas con altas concentraciones de cadmio, cromo, plomo, zinc y arsénico. Estas concentraciones estaban por encima de los "valores de referencia" (Tabla 13). Cabe destacar que la muestra S3 y S4 contenía niveles de cadmio que eran >9 veces que el SGV máximo para uso comercial y los valores de SGV que eran 4-5 veces el SGV del uso comercial del suelo para el plomo (Tabla 13).

Tabla 13. Concentraciones totales (mg / kg) de metales pesados (excepto Hg) en muestras tomadas de una zona minera activa (muestras S1-S6) y una zona minera abandonada (muestras T1-T6) en Segovia. Las EQS se basan en los Valores de la Guía de Suelos del Reino Unido;

Concentración del Metal [mg/kg]												
Muestra	Fe	Al	Mn	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Sn	Zn	As
S1	30,809	44,544	329	2	7	14	65	4	164	1	118	86
S2	31,537	17,511	103	3	3	24	54	2	416	1	93	239
S3	29,447	37,107	103	94	5	22	78	5	3,103	2	2,640	216
S4	45,180	1,310	157	98	5	60	29	7	4,431	1	3,128	375
S5	22,306	42,695	125	4	3	17	39	6	203	1	207	19
S6	41,768	54,424	977	0	29	34	27	22	143	1	47	8
T1	16,627	19,931	145	0	4	38	22	13	3	0	34	2
T2	11,245	21,343	112	0	3	37	21	11	2	0	30	2
T3	12,829	22,229	120	0	7	42	24	13	2	0	36	3
T4	2,171	31,942	20	0	5	28	16	16	6	1	18	0
T5	17,290	18,266	169	0	8	36	30	20	4	1	54	2
T6	8,721	13,679	88	0	3	28	16	11	2	0	27	1
SGV Residencial	n/a	n/a	n/a	10	n/a	130	n/a	130	450	n/a	n/a	32
SGV Jardinería / Cultivos	n/a	n/a	n/a	1.8	n/a	200	n/a	230	450	n/a	n/a	32
SGV Comercial	n/a	n/a	n/a	1.8	n/a	5000	n/a	1,800	750	n/a	n/a	640

Concentraciones lixiviables de mercurio y otros metales pesados en muestras tomadas de Segovia y Tadó

De la cantidad total de mercurio encontrada en las diferentes muestras <0,1% era soluble en agua. En la muestra 4S esto ascendió a 0,38 mg / kg de mercurio, lo que clasificaría este material como peligroso de acuerdo con la regulación WAC (Figura 29). Las muestras 1T, 5T y 6T también fallaron en WAC para residuos inertes (Figura 29). Si el material de S4 se lavara

en el río, 1 kg de material podría contaminar hasta 500 litros de agua a concentraciones que estarían por encima de la concentración permitida de la Directiva Marco del Agua (WFD).

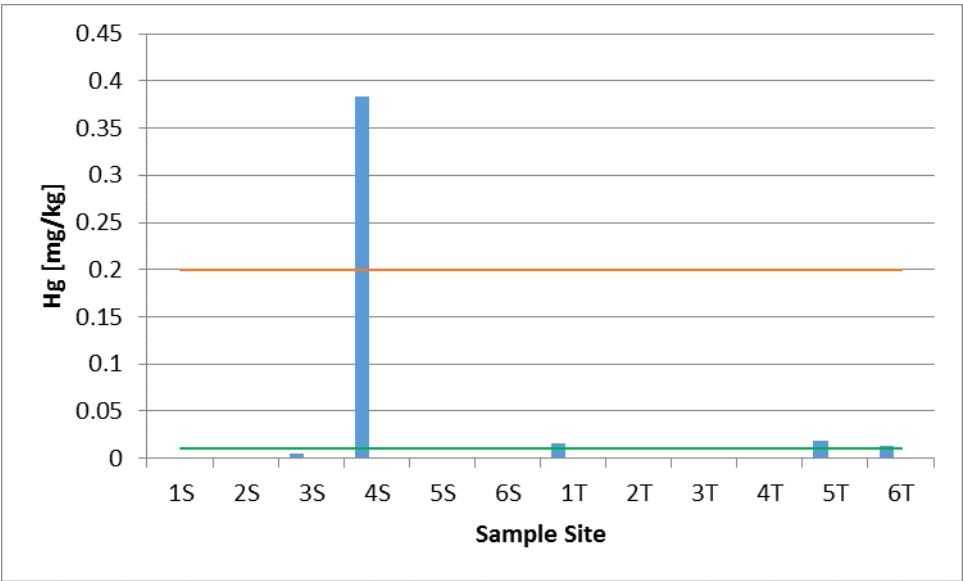


Figura 29. Concentraciones lixiviables de mercurio (mg Hg / kg) en muestras tomadas de un área minera activa (Muestras S1-S6) y una zona minera abandonada (Muestras T1-T6). La línea verde representa concentraciones de mercurio lixiviable por debajo de las cuales el suelo se clasificaría como "residuos inertes"; La línea ámbar representa la concentración por encima de la cual el suelo se clasificaría como "peligroso"

La muestra más contaminada con respecto a los niveles de metales pesados lixiviables fue la muestra 3S (Tabla 14). La capacidad de lixiviación de cadmio, plomo y zinc en esta muestra excedió el WAC (Criterio de aceptación de residuos) para residuos peligrosos, lo que significa que el suelo en el sitio de muestreo S3 era demasiado tóxico inclusive para ser dispuesto en un sitio de desechos peligrosos especialmente diseñado. La siguiente muestra más contaminada fue S2, que se clasificaría como residuo peligroso basado en los niveles de Zn lixiviable (Tabla 14). La muestra S5 tenía concentraciones de cadmio que estaban por encima del WAC Inerte (Tabla 14). La mayoría de las muestras estaban contaminadas lo suficiente como para causar la contaminación del agua si el suelo entraba en un río o un lago (Tabla 14).

Tabla 14. Concentraciones lixiviables (µg / kg) de metales pesados (excepto Hg) en muestras tomadas de una zona minera activa (muestras S1-S6) y una zona minera abandonada (muestras T1 a T6)

Concentración de Metal [µg/kg]												
Muestra	Fe	Al	Mn	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Sn	Zn	As
S1	43	113	36	6	3	6	9	18	0	2	232	1
S2	19,852	108,266	3,314	450	153	156	1,496	139	175	22	16,837	82
S3	1,658	41,008	10,268	32,097	1,382	22	299	1,448	109,307	41	898,740	76
S4	62	312	286	1	1	14	17	33	13	0	68	0
S5	33	155	81	50	3	0	68	53	33	19	1,679	9
S6	0	167	235	2	8	0	15	25	20	0	287	0

Concentración de Metal [µg/kg]

Muestra	Fe	Al	Mn	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Sn	Zn	As
T1	27	817	101	0	34	4	110	146	7	18	388	7
T2	265	967	134	4	91	7	242	464	16	0	1,011	0
T3	0	96	69	0	24	0	30	97	0	0	169	0
T4	342	13,766	195	2	140	3	54	381	280	0	419	0
T5	70	789	5	0	0	1	21	32	6	19	163	0
T6	110	3322	106	3	159	5	212	390	1	0	1,054	0
WAC Inerte	N/A	N/A	N/A	40	N/A	500	2000	400	500	N/A	4000	500
WAC Estable	N/A	N/A	N/A	1000	N/A	10,000	50,000	10,000	10,000	N/A	50,000	2000
WAC Peligroso	N/A	N/A	N/A	5000	N/A	70,000	100,000	40,000	50,000	N/A	200,000	25,000
WFD	1000	100	300	0.25	3	4.7	28	20	7.2	N/A	8	50

WFD basado en las normas anuales de la UE relativas a las aguas superficiales; WAC Inerte representa concentraciones de metales lixiviables por debajo de las cuales el residuo se clasifica como Inerte; WAC Estable representa las concentraciones de metales lixiviables por debajo de las cuales se clasifican los residuos como Residuos peligrosos no reactivos estables (sombreado amarillo). WAC Peligrosos representa las concentraciones de metales lixiviables por debajo de las cuales los residuos están clasificados como peligrosos (sombreado naranja); Por encima de este valor, los residuos son demasiado tóxicos para ser vertidos (sombreado rojo). El sombreado azul representa casos en los que 1 kg de suelo contaminaría 1 litro de agua por encima de las concentraciones que se consideran inaceptables para las aguas superficiales.

Métodos utilizados para el tratamiento de la contaminación por metales

Antecedentes de los productos C-Cure (info@ccuresolutions.com)

Las tecnologías licenciadas para C-Cure están diseñadas para acelerar la degradación de contaminantes orgánicos a través de la bio-remediación o para inmovilizar contaminantes, incluyendo metales pesados adsorbiéndolos. Una vez adsorbidos en los productos C-Cure, los contaminantes ya no son lixiviables y no interfieren con los procesos biológicos (desintoxicación). Hay que señalar que, en el caso de los metales pesados, el tratamiento con C-Cure no reduce la concentración total de metales pesados, sino que los hace no biodegradables y no se pueden lixiviar. Esto significa que la aplicación de los productos C-Cure a suelos contaminados garantiza que las vías de los contaminantes-receptores se rompan, de modo que los contaminantes ya no se infiltran en las aguas subterráneas y de superficie, ya no son absorbidos por las plantas ni causan eco-toxicidad. Dependiendo de las condiciones del suelo, la adsorción de la mayoría de los metales pesados sobre los productos C-Cure es irreversible y estable, pero incluso si las condiciones del suelo pueden conducir a la desorción (como el bajo pH del suelo), la estructura de los poros asegura que las

condiciones dentro del producto se mantengan y se “tamponen” o amortigüen de las condiciones externas del suelo. Bajo condiciones desfavorables, se demostró que la desorción metálica de partículas de carbón que tenían 2 mm de diámetro era 2000 veces más lenta que la desorción metálica de la cal.

Adicionalmente, la desintoxicación del suelo conduce a la restauración de la función normal del suelo y permite la revegetación. Tanto la adsorción de metales como la subsiguiente restauración ecológica garantizan la regeneración sostenible de los suelos contaminados.

Tratamiento de la Contaminación con Mercurio

La muestra de suelo 4S tuvo tanto la concentración de Hg total más alta (361 mg / kg) como la concentración de Hg lixiviable más alta (383 µg / kg).

Por lo tanto, la muestra de suelo 4S se usó para probar el tratamiento con el producto de tratamiento C-Cure-CCA.

El tratamiento del suelo se llevó a cabo utilizando tierra húmeda, sin suelo, y el tratamiento se aplicó como se indica en la Tabla 15. El suelo se mezcló minuciosamente con la enmienda en un crisol y se añadió una cantidad conocida de agua desionizada a la muestra para crear una muestra con un contenido de humedad del 25%. El suelo tratado se incubó luego durante 3 días a 4 °C.

Tabla 15. Tratamiento de la muestra de suelo 4S

Tratamientos	Suelo Seco (g)	Enmienda	Enmienda [g]	Humedad Añadida [ml]
CCA	11.666	5%	0.500	0.985

Seguidamente, el suelo tratado se extrajo secuencialmente utilizando los métodos descritos anteriormente, observando que se utilizaron inicialmente 1,3 g de suelo tratado para tener en cuenta el contenido de humedad de la muestra.

Tratamiento de la contaminación por metilmercurio

Se utilizó la muestra de suelo 4S para probar los métodos de tratamiento de metilmercurio dentro de la muestra. Se modificaron 10 g de suelo húmedo con 4 productos diferentes.

Se trataron 10 g de suelo húmedo con cada producto, usando una tasa de enmienda del 5%. El suelo se mezcló detenidamente con la enmienda y se añadió un poco de agua. Luego, el suelo tratado se incubó durante 24 horas antes de que se llevara a cabo el análisis como se ha descrito en la sección anterior de métodos.

Sin embargo, como no había metilmercurio en la muestra, no se pudo evaluar la efectividad de estos tratamientos para adsorber este compuesto.

Tratamiento de la contaminación por Al, Cd, Fe, Pb y Zn

La muestra de suelo S3 tenía una de las concentraciones más altas de aluminio lixiviable (41 mg / kg), cadmio (32 mg / kg), hierro (1,66 mg / kg), plomo (109 mg / kg) y zinc (898,7 mg /

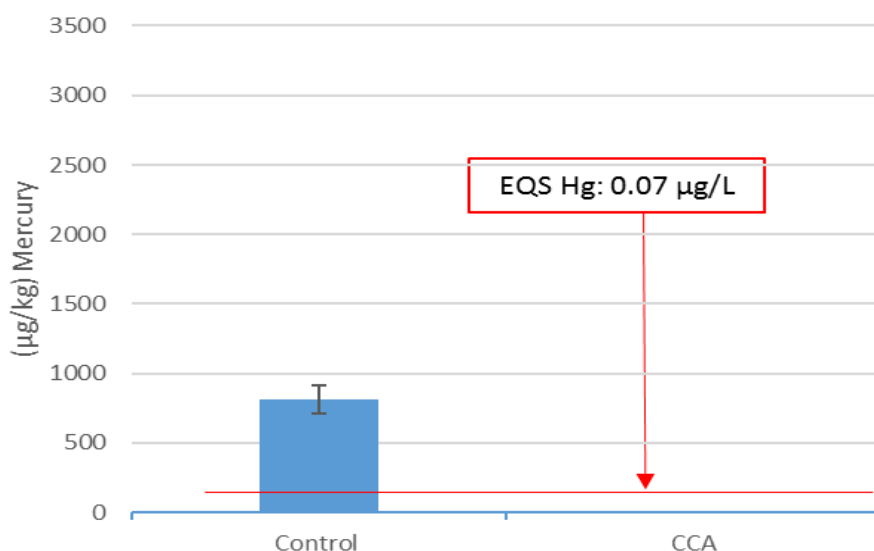
kg) de entre todas las muestras (Tabla 14). De hecho, las concentraciones lixiviables de cadmio, plomo y zinc harían que este suelo fuera demasiado tóxico para ser vertido en un relleno sanitario especialmente diseñado. Por lo tanto, la muestra S3 se usó para probar el producto de tratamiento de metales pesados estándar de C-Cure (C-Cure-TTLX).

El suelo se trató usando diferentes tasas de enmienda de aprox. 2,3% (m/m), 4,4% (m/m), 6,7% (m/m) y 8,9% (m/m) sobre la base del peso seco del suelo. Estas concentraciones son equivalentes a las tasas de modificación de 2,5, 5,0, 7,5 y 10% (m/m) sobre una base en peso húmedo.

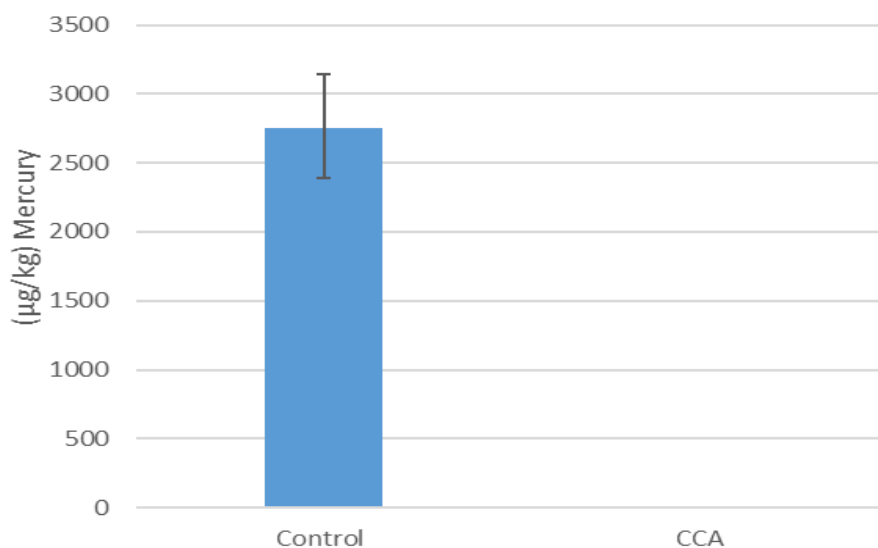
De esta manera, el suelo tratado se extrajo utilizando el método descrito anteriormente, utilizando $2,5 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$ de suelo para tener en cuenta el contenido de humedad del suelo tratado.

Resultados del Tratamiento de C-Cure para la Contaminación por Metales

La muestra S4 no contenía mercurio unido a materia orgánica ni contenía metilmercurio. El suelo no tratado de la muestra S4 contenía $812 \text{ } \mu\text{g} / \text{kg}$ de agua soluble y $2755 \text{ } \mu\text{g} / \text{kg}$ de mercurio soluble en ácido estomacal humano (Figura 30). El tratamiento con el producto C-Cure-CCA a una tasa de enmienda del 5% (m/m) dio como resultado que todo el mercurio hidrosoluble y soluble en el ácido estomacal humano se eliminara del suelo (Figura 30). En el suelo tratado con CCA se encontró que la mayoría (72%) del mercurio era extraíble con 10M de HNO_3 , lo que representa mercurio elemental. En el suelo no tratado, el porcentaje de mercurio extraíble de 10M HNO_3 fue del 51%.



a) Mercurio Soluble en Agua



b) Mercurio Soluble en Ácido Estomacal Humano

Figura 30. Cantidad de mercurio hidrosoluble (a) y soluble en ácido estomacal humano (b), en suelo tomado de la muestra S4 en la muestra control y las muestras tratadas con 5% (m/m) del producto C-Cure (CCA). N=2.

Una prueba adicional, destinada a cuantificar la cantidad mínima de producto C-Cure que se necesitaba para unir todo el mercurio soluble en agua y ácido estomacal, mostró que una tasa de enmienda de 0,5% (m/m) redujo la concentración de mercurio soluble en agua en 80 %, mientras que una tasa de enmienda del 1% resultó en la eliminación completa del mercurio soluble en agua (Figura 31).

Para eliminar todo el mercurio soluble en ácido estomacal, se necesitó una tasa de enmienda del 5%; mientras que una tasa del 3% (m/m) eliminó el 95% de todo el mercurio soluble en ácido estomacal del suelo (Figura 32).

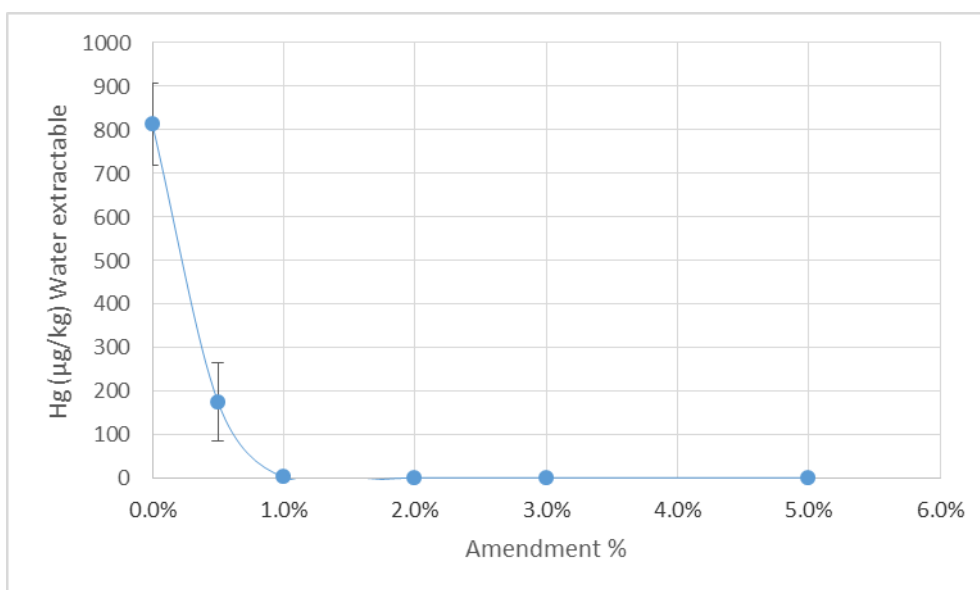


Figura 31. Concentraciones (µg / kg) de mercurio soluble en agua en el suelo extraído del sitio de muestreo S4 modificado con cantidades crecientes (0, 0,5, 1, 2, 3 y 5% m/m) de producto C-Cure (CCA). N = 2.

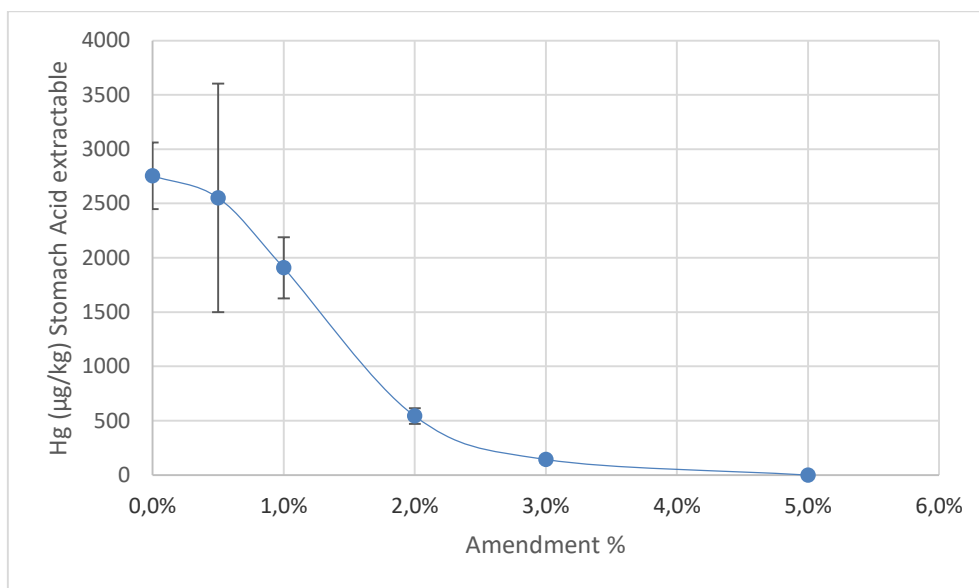


Figura 32. Concentraciones ($\mu\text{g} / \text{kg}$) de mercurio soluble en ácido estomacal, en suelo tomado del sitio de muestreo S4 modificado con cantidades crecientes (0, 0,5, 1, 2, 3 y 5% m/m) de producto C-Cure (CCA). $N = 2$.

Tratamiento de la contaminación por metales pesados

Aluminio

Las concentraciones lixiviables de aluminio pasaron de 947 mg / kg en el suelo no tratado a menos de 0,01 mg / kg en el suelo que fue modificado con el producto C-Cure al 2,3%, una reducción del 99,999% (Figura 33). Esto significa que las muestras tratadas cumplirían con las más estrictas EQS.

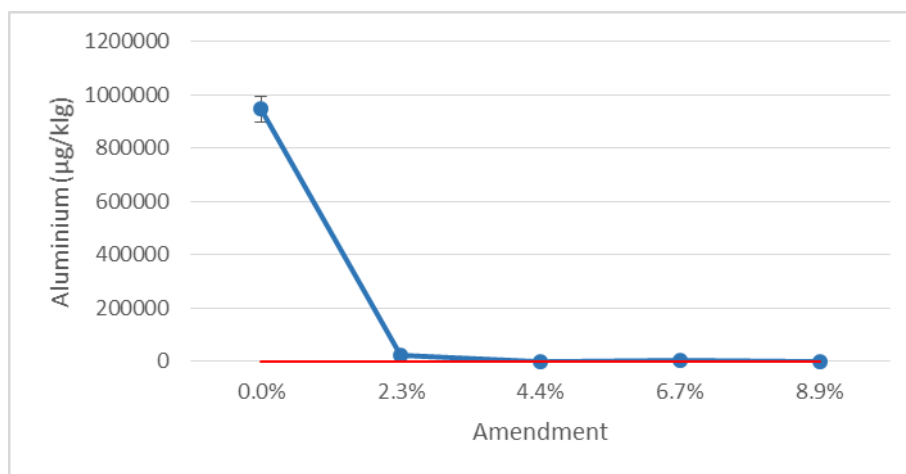


Figura 33. Concentraciones de aluminio lixiviable ($\mu\text{g} / \text{kg}$) en el suelo extraído del sitio S3 antes y después del tratamiento con producto adsorbente de metal C-Cure (C-Cure-TTLX) de 2,3, 4,4, 6,7 o 8,9% (m/m). $N = 2$. La línea roja representa la media anual de EQS para las aguas superficiales de la UE.

Níquel

El níquel lixiviable se redujo en un 94% utilizando el tratamiento C-Cure. Las concentraciones lixiviables pasaron de 2,1 mg de Ni / kg de suelo a 0,12 mg de Ni / kg de suelo con una tasa de enmienda del 7,5% de producto C-Cure (Figura 34). Este valor clasificaría el material como "inerte" de acuerdo con el WAC del Reino Unido.

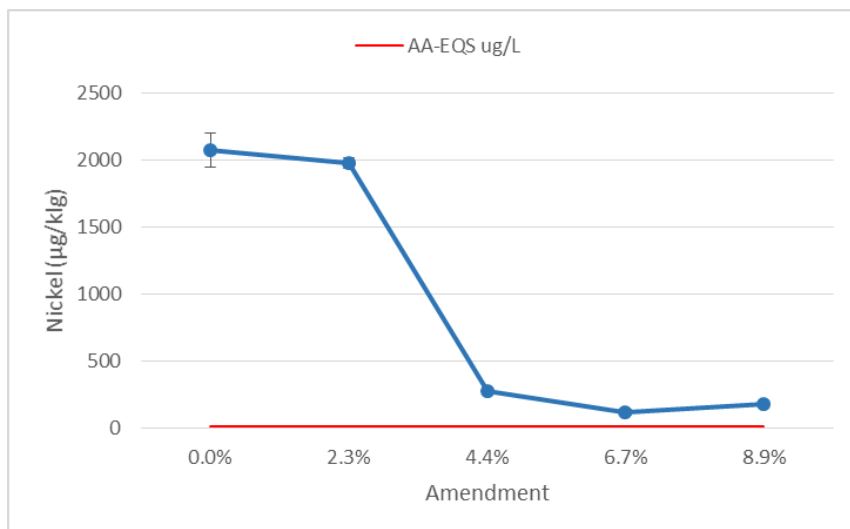


Figura 34. Concentraciones de níquel lixiviable ($\mu\text{g} / \text{kg}$) en el suelo extraído del sitio S3 antes y después del tratamiento con 2,3, 4,4, 6,7 o 8,9% (m/m) de producto de adsorción de metal C-Cure (TTLX). $N = 2$. La línea roja representa la media anual de EQS para las aguas superficiales de la UE.

Cobre

La concentración de cobre lixiviable pasó de más de 14mg / kg a 0.114mg / kg con una tasa de enmienda de 4.4%, una reducción de 99.2%. Esta disminución hizo que el suelo quedara por debajo del WAC para residuos inertes. El aumento de la tasa de enmienda por encima del 4,4% no dio lugar a nuevas reducciones del cobre lixiviable (Figura 35).

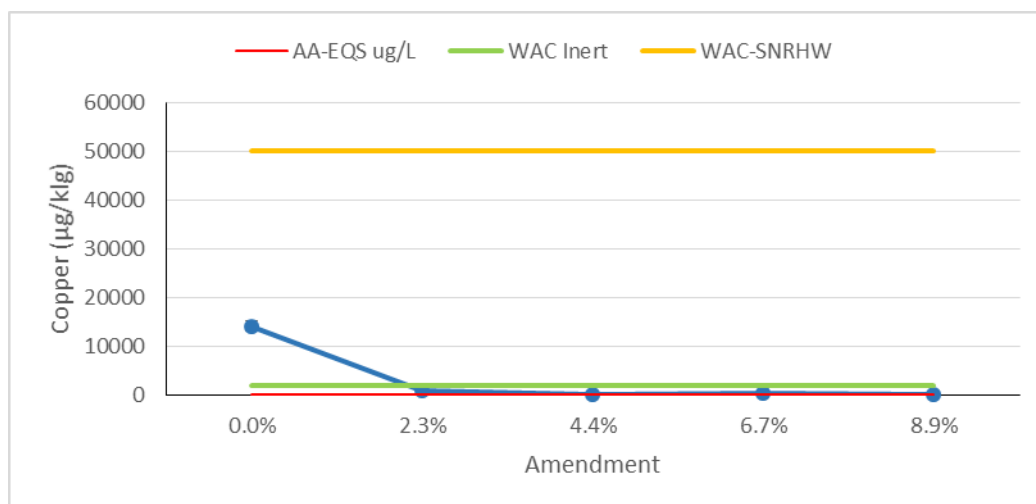


Figura 35. Concentraciones de cobre lixiviable ($\mu\text{g} / \text{kg}$) en el suelo extraído del sitio S3 antes y después del tratamiento con 2,3, 4,4, 6,7 o 8,9% (m/m) de producto de adsorción de metal C-Cure (TTLX). $N = 2$. La línea roja representa las EQS medias anuales para las aguas superficiales de la UE; La línea verde clara es la

concentración de aceptación de residuos para residuos inertes y la línea púrpura es la concentración de aceptación de residuos para residuos peligrosos no reactivos estables.

Hierro

La concentración de hierro lixiviable pasó de más de 1500 mg / kg de suelo en el control no tratado a 0,1 mg / kg en suelo modificado con una tasa de enmienda de 2,3% o más; Una reducción del 99,99% (Figura 36). Esta concentración estaba muy por debajo de la concentración de hierro lixiviable que sería aceptable para la clasificación como residuo inerte de acuerdo con el WAC.

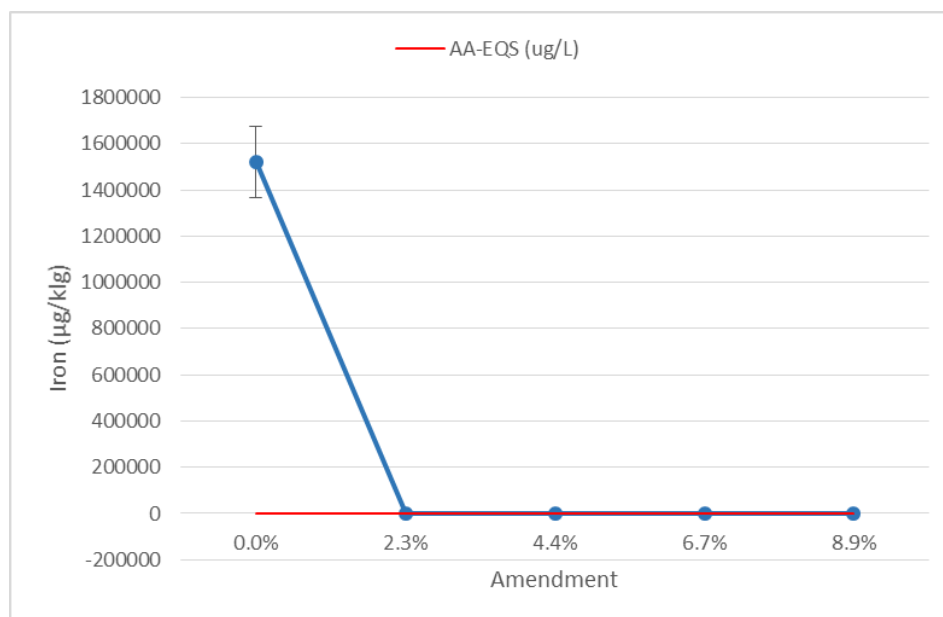


Figura 36. Concentraciones de hierro lixiviable (µg / kg) en el suelo extraído del sitio S3 antes y después del tratamiento con 2,3, 4,4, 6,7 o 8,9% (m(m) de producto de adsorción de metal C-Cure (TTLX). N = 2. La línea roja representa el promedio anual de EQS para las aguas superficiales de la UE.

Plomo

La concentración de plomo lixiviable pasó de más de 26 mg / kg en el control no tratado a 0,34 mg / kg en el suelo modificado con el producto C-Cure al 8,9%; Una reducción del 98,7%. Se consiguió una reducción similar del plomo lixiviable con la mitad de la tasa de modificación (Figura 37). El suelo no tratado sería clasificado como peligroso según WAC; sin embargo, después del tratamiento, la concentración restante de plomo lixiviable en el suelo tratado con C-Cure permitiría que el suelo fuera clasificado como residuo inerte de acuerdo con los criterios WAC (Figura 37)

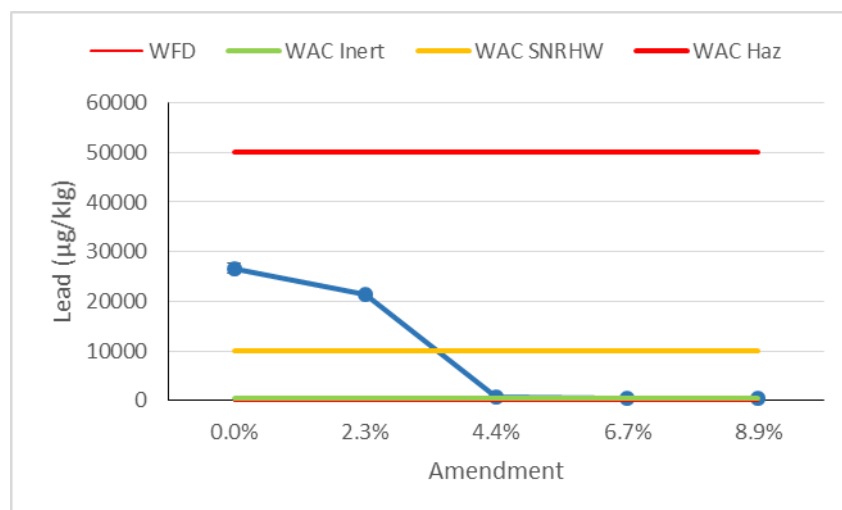


Figura 37. Concentraciones de plomo lixiviable ($\mu\text{g} / \text{kg}$) en el suelo extraído del sitio S3 antes y después del tratamiento con 2,3, 4,4, 6,7 o 8,9% (m/m) de producto de adsorción de metal C-Cure (TTLX). $N = 2$. La línea roja representa los promedios anuales de EQS para las aguas superficiales de la UE; La línea verde clara es la concentración de aceptación de desechos para residuos inertes y la línea púrpura es la concentración de aceptación de desechos para residuos peligrosos no reactivos estables y la línea roja gruesa representa la WAC para residuos peligrosos.

Estaño

La concentración de estaño lixiviable pasó de más de 57 $\mu\text{g} / \text{kg}$ en el control no tratado a concentraciones no detectables en el suelo modificado con 2,3% (m/m) o más del producto C-Cure (Figura 38).

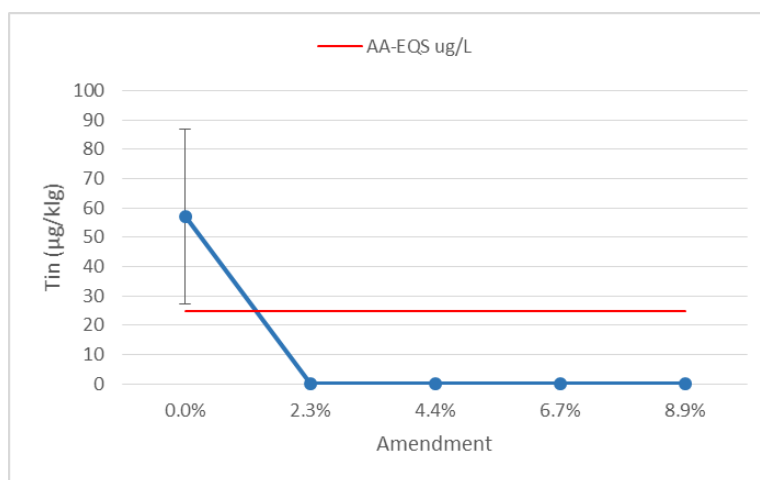


Figura 38. Concentraciones de estaño lixiviable ($\mu\text{g} / \text{kg}$) en el suelo extraído del sitio S3 antes y después del tratamiento con producto de adsorción de metal C-Cure (TTLX) de 2,3, 4,4, 6,7 o 8,9% (m/m). $N = 2$. La línea roja representa el promedio anual de EQS para las aguas superficiales de la UE.

Zinc

La concentración de zinc lixiviable pasó de más de 2000 mg / kg en el control no tratado a alrededor de 50 mg / kg en el suelo modificado con un producto C-Cure de > 6,7% (Figura 39). Considerando que el resto de Zn lixiviable sigue siendo considerado como peligroso, la clase de riesgo de suelos se redujo de "por encima de peligroso" a "residuo peligroso no reactivo estable" (Figura 39).

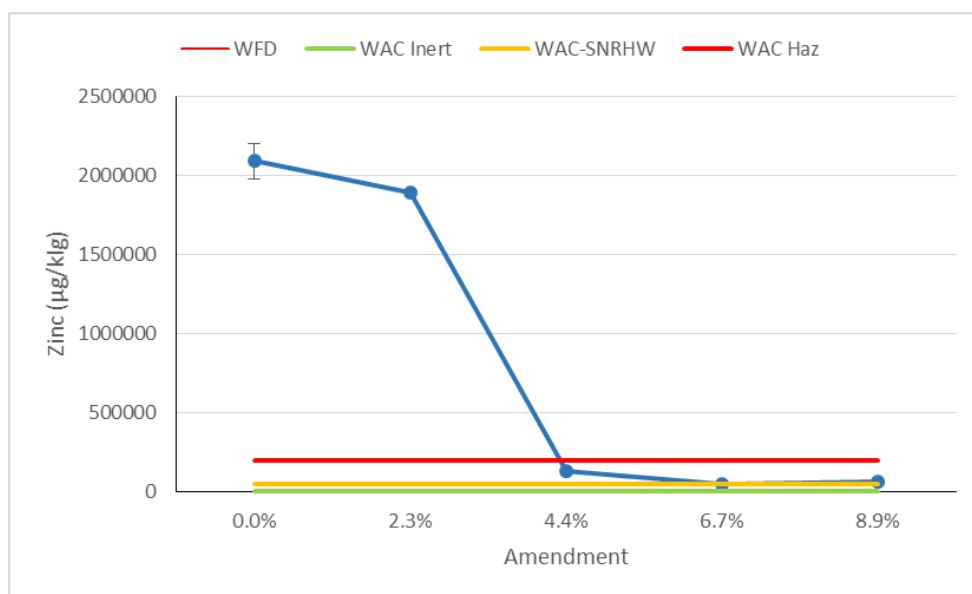


Figura 39. Concentraciones de zinc lixiviable ($\mu\text{g} / \text{kg}$) en el suelo extraído del sitio S3 antes y después del tratamiento con 2,3, 4,4, 6,7 o 8,9% (m/m) de producto de adsorción de metal C-Cure (TTLX). $N = 2$. La línea roja representa los promedios anuales de EQS para las aguas superficiales de la UE; La línea verde clara es la concentración de aceptación de desechos para residuos inertes y la línea ámbar es la concentración de aceptación de desechos peligrosos no reactivos estables y la línea roja gruesa representa la WAC para residuos peligrosos.

Cadmio

La concentración de cadmio lixiviable pasó de 85,8 mg / kg a 3,5 mg / kg con una enmienda de 8,9% de TTLX, una reducción del 96%. Esta reducción fue suficiente para reducir la clase de riesgo del suelo de 9 veces por encima de la clase de residuos peligrosos, hasta bien dentro de la categoría de residuos peligrosos según WAC (Figura 40).

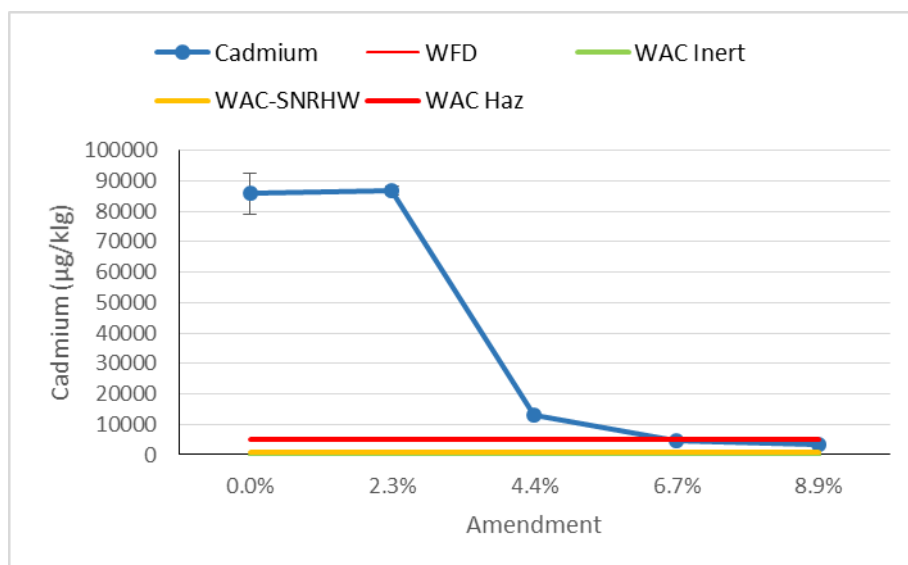


Figura 40. Concentraciones de cadmio lixiviable ($\mu\text{g} / \text{kg}$) en el suelo tomado del sitio S3 antes y después del tratamiento con 2,3, 4,4, 6,7 o 8,9% (m/m) de producto de adsorción de metal C-Cure (TTLX). $N = 2$. La línea roja representa los promedios anuales de EQS para las aguas superficiales de la UE; La línea verde claro es la

concentración de aceptación de desechos para residuos inertes y la línea gris es la concentración de aceptación de desechos peligrosos no reactivos estables y la línea roja gruesa representa la WAC para residuos peligrosos.

Cromo

La concentración de cromo lixivable pasó de más de 2 mg / kg a 0,114 mg / kg con una tasa de enmienda de 4,4%, logrando una reducción de 99,2%. El aumento de la tasa de modificación por encima del 2,3% no dio lugar a nuevas reducciones del contenido de cromo lixivable (Figura 41). Esto significa que la clasificación de peligros de este suelo pasó de "residuos peligrosos no reactivos" a "inerte" (Figura 41)

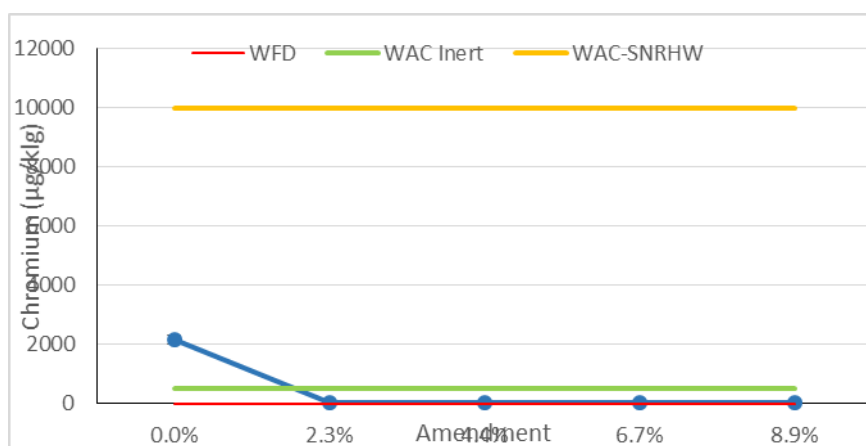


Figura 41. Concentraciones de cromo lixivable ($\mu\text{g} / \text{kg}$) en el suelo extraído del sitio S3 antes y después del tratamiento con 2,3,4,4,7,7 o 8,9% (m/m) de producto de adsorción de metal C-Cure (TTLX). $N = 2$. La línea roja representa los promedios anuales de EQS para las aguas superficiales de la UE; La línea verde clara es la concentración de aceptación de desechos para residuos inertes y la línea gris es la concentración de aceptación de desechos peligrosos no reactivos estables y la línea roja gruesa representa la WAC para residuos peligrosos.

Arsénico

La muestra S3 no tratada contenía 2000 μg de arsénico lixivable por kg de suelo. Una tasa de enmienda del 2,5% con el producto C-Cure dio como resultado la eliminación casi completa del arsénico lixivable (Figura 42). La adición de más producto C-Cure-TTLX dio lugar a un pequeño aumento gradual en la capacidad de lixiviación de 12 $\mu\text{g} / \text{kg}$ a una tasa de modificación de 2,3% (m/m) a 42 $\mu\text{g} / \text{kg}$ a una tasa de enmienda del 10%. Esto significa que la muestra tratada podría clasificarse como "inerte" según WAC. Además, los bajos niveles de arsénico lixivable en la muestra tratada significaron que esta muestra no causaría contaminación del agua según los criterios de la WFD (Figura 42).

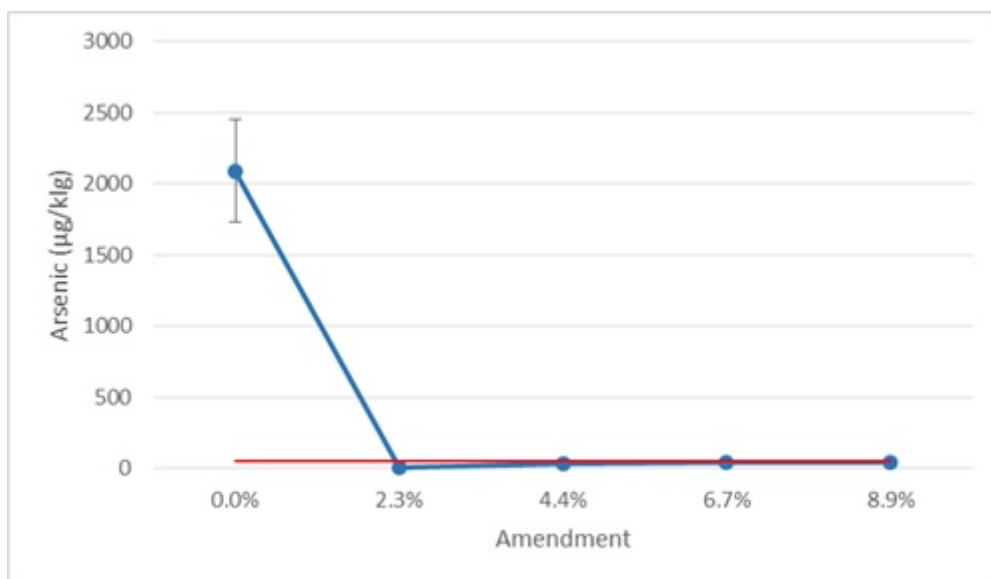


Figura 42. Concentraciones de arsénico lixiviable ($\mu\text{g} / \text{kg}$) en el suelo extraído del sitio S3 antes y después del tratamiento con 2,3, 4,4, 6,7 o 8,9% (m/m) de producto de adsorción de metal C-Cure (TTLX). $N = 2$. La línea roja representa los promedios anuales de EQS para las aguas superficiales de la UE.

Resumen

- De las 12 muestras recibidas para el análisis, sólo una (Muestra S4) contenía cantidades significativas de mercurio lixiviable (0,38 mg / kg de suelo).
- La muestra S4 tuvo la mayor cantidad de mercurio total (350 mg / kg), seguida de la muestra S3 que contenía 60 mg / kg de mercurio.
- La extracción secuencial de la muestra S4 reveló que el 1% de la cantidad total de mercurio en esta muestra era extraíble con agua, un 2% adicional extraíble con ácidos estomacales, un 51% adicional extraíble con 10M de ácido nítrico y el resto (46%) se convirtió en extraíble con *Aqua Regia*.
- Ninguna cantidad del mercurio hallado en la muestra S4 estaba ligado a materia orgánica.
- No se encontró metil mercurio en la muestra S4
- El tratamiento con CCA del producto C-Cure, resultó en la eliminación completa del mercurio soluble en agua, así como el mercurio soluble en ácido estomacal.
- La muestra S3 contenía niveles altamente peligrosos de cadmio, plomo y zinc, lixiviable en agua, mientras que otros metales pesados como cobre, estaño, cromo, aluminio, hierro y arsénico estaban elevados.
- El tratamiento con el producto de adsorción de metal C-Cure (CCLX) produjo grandes reducciones (90 a 100%) en todas las concentraciones de metal lixiviable.
- El tratamiento con el producto de adsorción de metal C-Cure redujo significativamente la clase de peligro del material (Tabla 16).

Tabla 16. Resumen de concentraciones de metales en muestras tratadas y no tratadas y clasificación de peligros antes y después del tratamiento con diferentes cantidades de producto adsorbente metálico C-Cure. A menos que se especifique de otra manera, las clasificaciones de peligros se basan en WAC, donde el verde representa el residuo inerte, el color amarillo representa el residuo peligroso no reactivo estable, el color ámbar

representa el residuo peligroso y el rojo representa un residuo demasiado tóxico para ser aceptado en un vertedero peligroso sitio.

Elemento	Tasa de Enmienda (% m/m)				
	0 (control)	2.3%	4.4%	6.7%	8.9%
Al* [µg/kg]	946733	20487	90	333	0
As [µg/kg]	2092	12	36	42	41
Cd [µg/kg]	85785	86663	13225	4534	3513
Cr [µg/kg]	2167	44	41	40	32
Cu [µg/kg]	14043	738	114	175	148
Fe* [µg/kg]	1519008	668	92	105	121
Ni [µg/kg]	2076	1978	281	121	179
Pb [µg/kg]	26607	21392	767	584	338
Zn [µg/kg]	2092372	1891961	136821	48919	64837

* EQS basadas en las directrices de la UE sobre el marco para el agua.