



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



BICENTENARIO
DEL PERÚ
2024

GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS Y LA ELABORACIÓN DE PLANES DIRIGIDOS A LA REMEDIACIÓN





PERÚ

Ministerio
del Ambiente

GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS Y LA ELABORACIÓN DE PLANES DIRIGIDOS A LA REMEDIACIÓN

2024

Índice

Introducción	7
--------------------	---

1. Evaluación y gestión de sitios contaminados11

1.1. Definición de un sitio contaminado	11
1.2. Enfoque integral de la gestión de riesgos en sitios contaminados	13
1.3. Actores involucrados y comunicación	15
1.4. Aseguramiento y control de calidad	16
1.4.1. La calidad de los datos	16
1.4.2. Plan de aseguramiento de la calidad	19
1.4.3. Indicadores de la calidad de los datos.....	19
1.4.4. Medidas para el control de calidad.....	19
1.5. Fases de gestión de un sitio contaminado	23
1.6. Definición de los objetivos del estudio de evaluación	23
1.6.1. Objetivo general.....	23
1.6.2. Objetivos específicos	25
1.7. Modelo conceptual del sitio	25
1.7.1. Definición y desarrollo.....	25
1.7.2. Procedimiento de elaboración	28
1.8 Principales tipos de contaminación y estrategias de muestreo.....	38
1.8.1. Tipología de casos	38
1.8.2. Tipo 1. Contaminación del suelo superficial	38
1.8.3. Tipo 2. Contaminación del subsuelo (zona no saturada)	42
1.8.4. Tipo 3. Contaminación del agua subterránea (zona saturada).....	46
1.8.5. Tipo 4. Contaminación con fase líquida no acuosa ligera (LNAPL).....	53
1.8.6. Tipo 5. Contaminación con fase líquida no acuosa pesada (DNAPL)	61

2. Fase de identificación de sitios contaminados.....65

2.1. Objetivos y alcance	65
2.2. Evaluación preliminar	66
2.2.1. Investigación histórica.....	66
2.2.2. Levantamiento técnico del sitio	74
2.2.3. Presentación y evaluación de resultados	77
2.3. Muestreo de identificación	79

2.3.1. Objetivos.....	81
2.3.2. Alcance mínimo y criterios conceptuales.....	83
2.3.3. Plan de muestreo	83
2.3.4. Ejecución.....	83
2.3.5. Presentación y evaluación de resultados	84
2.4. Muestreo del nivel de fondo	86
2.5. Criterios para determinar la necesidad de continuar con la fase de caracterización.....	89
2.6. Informe de identificación de sitios contaminados.....	92
3. Fase de caracterización de sitios contaminados.....	95
3.1. Objetivos y alcance	95
3.2. Muestreo de detalle.....	95
3.2.1. Objetivos.....	95
3.2.2. Plan de muestreo	96
3.2.3. Ejecución.....	96
3.2.4. Evaluación y reporte de los resultados.....	97
3.3. Evaluación de riesgos a la salud y el ambiente	97
3.4. Sobre la necesidad de remediar un sitio contaminado.....	98
3.5 Estudio de caracterización de sitios contaminados.....	99
4. Elaboración del plan dirigido a la remediación.....	101
4.1. Principios y enfoques para la remediación de sitios contaminados	101
4.2. Tipos de medidas de remediación	101
4.2.1. Definición y alcance	102
4.2.2. Medidas de descontaminación.....	102
4.2.3. Medidas de aseguramiento.....	104
4.2.4. Técnicas de remediación	104
4.3. Otras medidas de gestión de un sitio contaminado.....	107
4.3.1. Medidas de acción inmediata.....	107
4.3.2. Controles institucionales.....	108
4.3.3. Atenuación natural monitoreada	109
4.4. Análisis de las alternativas de remediación y determinación de las medidas más convenientes.....	111
4.4.1. Tecnologías disponibles.....	111
4.4.2. Sostenibilidad.....	112
4.4.3. Costo-efectividad	116
4.4.4. Factores de ecoeficiencia	116
4.4.5. Resultados de pruebas de laboratorio y/o ensayos piloto	116
4.5. Planificación detallada de la propuesta de remediación	119

4.5.1. Objetivos específicos de las medidas de remediación	119
4.5.2. Descripción de las medidas de remediación.....	119
4.5.3. Contenidos adicionales.....	120
4.6. Comprobación de la remediación	121
4.7. Plan dirigido a la remediación	122
Glosario.....	125
Bibliografía	129
Abreviaciones.....	133
Anexo 1 Flujograma general para la gestión de sitios potencialmente contaminados y sitios contaminados	136
Anexo 2 Informe de identificación de sitios contaminados (IISC): estructura y descripción del contenido	138
Anexo 3 Estudio de caracterización (EC): estructura y descripción del contenido	143
Anexo 4 Plan dirigido a la remediación (PdR): estructura y descripción del contenido	151
Anexo 5 Cuestionario para el levantamiento técnico (inspección) del sitio: formato	160
Anexo 6 Elementos orientadores para la evaluación preliminar	164
Anexo 7 Modelos conceptuales de sitios contaminados	171
Anexo 8 Presentación de los resultados de muestreo: formato	176
Anexo 9 Orientaciones para el levantamiento topográfico.....	177
Anexo 10 Matriz para el análisis de alternativas de remediación.....	179



Introducción



La presente guía busca ser una herramienta de trabajo útil para los responsables de sitios potencialmente contaminados o contaminados, para los consultores o las empresas consultoras que están a cargo de realizar las evaluaciones en dichos sitios, para las autoridades competentes que evalúan y aprueban los informes y los estudios correspondientes, y para la sociedad civil en general.

Su elaboración se ha realizado sobre la base de la competencia del Ministerio del Ambiente (MINAM) para aprobar las guías técnicas para la gestión de sitios contaminados, normas ambientales vigentes y publicaciones sobre investigaciones científicas actuales.

/7

Antecedentes

A lo largo de las últimas décadas, la economía peruana figura entre aquellas que presenta un mayor crecimiento en la región de América Latina, principalmente debido a la inversión en el desarrollo de actividades extractivas, en el sector minero o de hidrocarburos, por mencionar algunos ejemplos.

En el país, los recursos naturales se han extraído por siglos, pero fue solo a inicios de la década de 1990 que se dieron los primeros pasos para gestionar los impactos ambientales de las actividades económicas. Desde ese entonces, el marco de gestión ambiental peruano ha ido evolucionando de la mano del contexto mundial de protección al ambiente y al desarrollo sostenible, por lo que existen grandes diferencias en comparación con la escasa regulación de las décadas pasadas.

Una de las preocupaciones ambientales en el Perú son las áreas con presencia de sustancias tóxicas o ecotóxicas en los suelos, denominadas sitios contaminados, que pueden representar un riesgo para la salud humana o para el ambiente.

En el pasado, el desarrollo de actividades económicas se realizó, en muchos casos, sin considerar prácticas ambientalmente adecuadas y se abandonaron los emplazamientos sin un apropiado cierre de componentes e instalaciones y sin invertir en medidas orientadas a mitigar los impactos negativos generados por la actividad a lo largo de su operación. Por esta razón, hoy en día se encuentra gran cantidad de pasivos ambientales en el país. De ellos, los sitios potencialmente contaminados se asocian a actividades que usaron, manejaron, produjeron, emitieron o dispusieron materiales, sustancias o residuos peligrosos.

Los sitios contaminados

En general, el universo de los sitios contaminados engloba pasivos ambientales y áreas de actividades en curso, principalmente relacionadas con operaciones petroleras, mineras e industriales. Además, incluye las áreas de disposición inadecuada de residuos (como botaderos, depósitos de relave y escombros), estaciones de servicio (grifos) o lavanderías al seco, áreas abandonadas, entre otros.

Resulta importante agregar que la economía peruana presenta actualmente un proceso de cambio estructural orientado al predominio de los sectores comercio y servicios. Este cambio implica el cese de actividades industriales, cuyo cierre inadecuado puede generar pasivos ambientales con potencial presencia de contaminación en el suelo.

Asimismo, ante la falta de espacios para el desarrollo de viviendas, el futuro del mercado inmobiliario en los conglomerados urbanos se orienta a la transformación de las zonas industriales en zonas mixtas o zonas residenciales. En el marco de este cambio de uso del suelo surge la necesidad de evaluar si las actividades industriales han generado sitios contaminados que pudieran representar un riesgo para los futuros usuarios de estos terrenos.

Marco legal

Debido a las situaciones expuestas, cabe la posibilidad de que se generen sitios contaminados en la actualidad o en el futuro. Por consiguiente, esa problemática es un tema que mantiene relevancia en el mediano y en el largo plazo, y requiere de instrumentos legales que permitan realizar acciones de evaluación y remediación en estos sitios, con el propósito de proteger la salud de la población y preservar el ambiente.

En ese sentido, se cuenta con Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo, aprobados por el Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM, los cuales constituyen un referente obligatorio para el diseño y aplicación de los instrumentos de gestión ambiental, y son aplicables para aquellos parámetros asociados a las actividades productivas, extractivas y de servicios.

De acuerdo con el citado Decreto Supremo¹, de superarse los ECA para Suelo, en aquellos parámetros asociados a las actividades productivas, extractivas y

1. Artículo 3 del Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM.

de servicios, las personas naturales y jurídicas a cargo de estas deben realizar acciones de evaluación y, de ser el caso, ejecutar acciones de remediación de sitios contaminados, con la finalidad de proteger la salud de las personas y el ambiente; salvo que la superación de los ECA para Suelo sea inferior a los niveles de fondo, los cuales proporcionan información acerca de las concentraciones de origen natural de las sustancias químicas presentes en el suelo, que pueden incluir el aporte de fuentes antrópicas no relacionadas al sitio en evaluación.

Asimismo, se cuenta con los “Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados”, aprobados por el Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM, los cuales tienen por objeto establecer los criterios para la gestión de sitios contaminados generados por actividades antrópicas, los cuales comprenden aspectos de evaluación y remediación, a ser regulados por las autoridades sectoriales competentes, con la finalidad de proteger la salud de las personas y el ambiente.

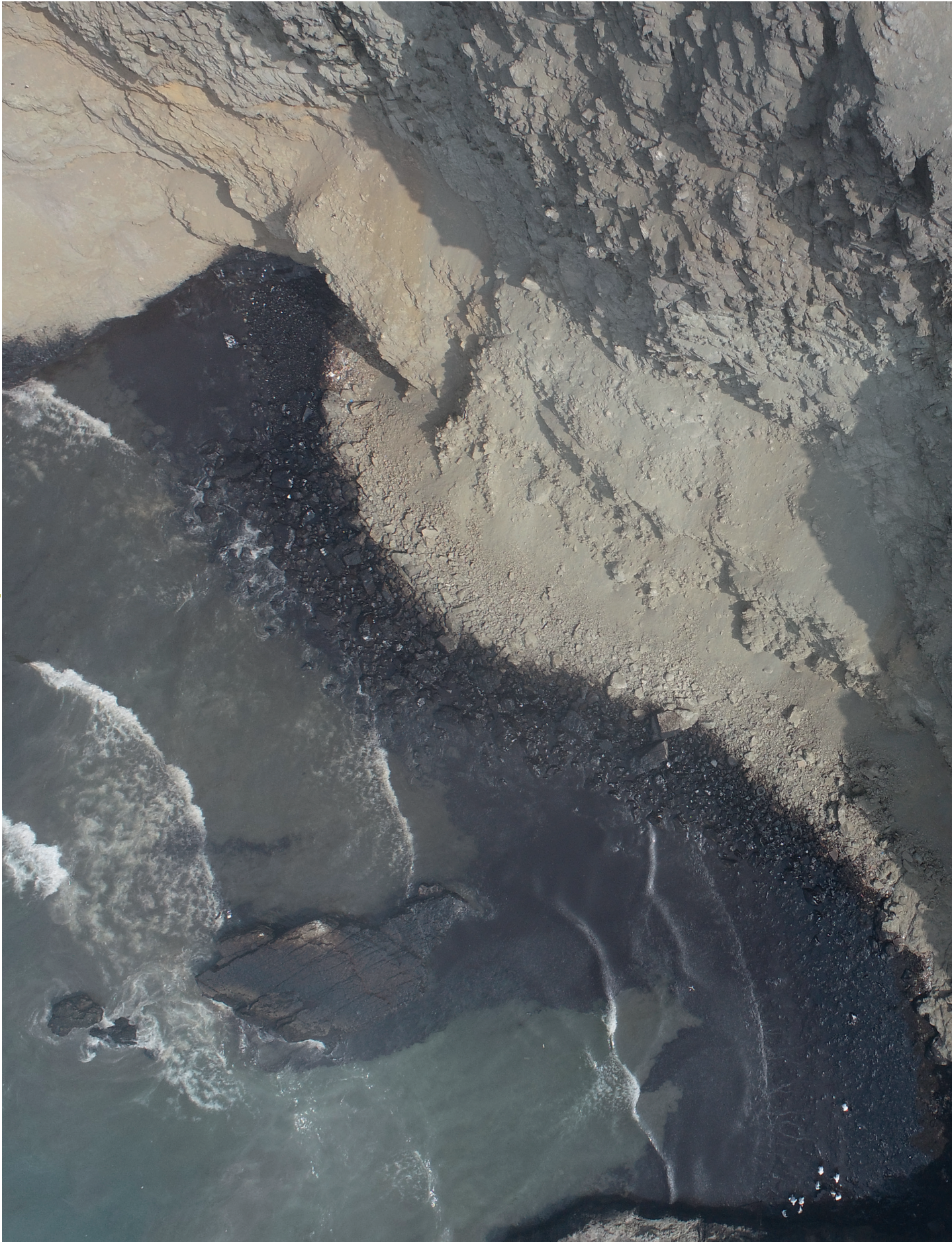
En esta última norma se dispone que el Ministerio del Ambiente apruebe guías técnicas para la gestión de sitios contaminados², estando entre ellas, la presente Guía.

Finalidad de la guía

Esta guía establece lineamientos para la evaluación de sitios potencialmente contaminados y sitios contaminados, y para la elaboración de planes dirigidos a la remediación (PdR), conforme a los criterios para la gestión de sitios contaminados, con la finalidad de:

- ◆ Presentar criterios generales y específicos sobre cómo se realizan las labores de evaluación en un sitio (potencialmente) contaminado, con el fin de facilitar la identificación y la caracterización de la contaminación en él. Para ello, se exponen diferentes metodologías y se establecen lineamientos respecto a la estrategia de muestreo en suelos y en otros componentes ambientales.
- ◆ Brindar orientaciones técnicas que permiten determinar la necesidad y el alcance de la remediación de un sitio contaminado.
- ◆ Proporcionar lineamientos para la elaboración de los informes de identificación de sitios contaminados (IISC), de los estudios de caracterización (EC) y de los planes dirigidos a la remediación (PdR).

2. Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM.



Evaluación y gestión de sitios contaminados

Este capítulo presenta consideraciones generales sobre la evaluación y la gestión de sitios contaminados, e incluye conceptos básicos y temas transversales que se deben tener en cuenta a lo largo del proceso de tratamiento de un sitio contaminado.

(1)

1.1. Definición de un sitio contaminado

La gestión de sitios contaminados es una tarea a la que se enfrenta la mayoría de países industriales y emergentes. Sin embargo, en el ámbito internacional no existe una definición única de lo que es un sitio contaminado. Por ejemplo, la Comisión Europea reconoce la existencia de tres acepciones principales al respecto (Carlón, 2007).

La primera define un sitio como contaminado cuando tiene en sus suelos sustancias nocivas de origen antrópico (contaminantes), con independencia de su concentración.

La segunda define un *sitio como contaminado* cuando existen en los suelos sustancias contaminantes que superan valores genéricos o referenciales, los cuales indican riesgos potenciales para las personas o, en algunos casos, para el ambiente. Estos valores están usualmente en función del uso del suelo.

La tercera define un sitio como contaminado cuando la presencia de contaminantes implica

DEFINICIONES

SITIO CONTAMINADO

Área en la cual el suelo contiene contaminantes provenientes de actividades antrópicas, en concentraciones que pueden representar riesgos para la salud o el ambiente debido a que superan los estándares de calidad ambiental (ECA) para suelo, estándares internacionales aprobados por el MINAM o los niveles de fondo, siempre que estos últimos presenten valores que excedan dichos estándares.

El área identificada como sitio contaminado puede comprender el agua subterránea subyacente, los sedimentos u otros componentes ambientales que resulten afectados por la contaminación del suelo, cuando se encuentren dentro de esta.

SITIO POTENCIALMENTE CONTAMINADO

Área en la cual el suelo puede contener contaminantes provenientes de actividades

a la vez un riesgo comprobado e inaceptable para las personas (y/o el ambiente). En estos casos, un sitio contaminado requiere siempre la aplicación de medidas correctivas con el fin de proteger a las personas o al ambiente de los riesgos que conlleva la contaminación del sitio.

En la mayoría de los países y en el Perú, la definición de sitio contaminado incluye que la contaminación sea de origen antrópico. Por ejemplo, una zona con alteraciones naturales de metales pesados en los suelos no se considera como un sitio contaminado, puesto que las sustancias tóxicas, en este caso los metales, son de origen geogénico y no han sido liberados al ambiente por alguna actividad humana.

En el país existe una definición muy clara sobre lo que se debe entender como un sitio contaminado (ver recuadro).

Conforme a esta definición, en el Perú un sitio contaminado presenta una contaminación (antrópica) del suelo que se manifiesta por concentraciones de contaminantes que superan los ECA para suelo, los niveles de fondo (NdF), en caso que estos se encuentren por encima de los ECA para suelo, o los estándares internacionales aprobados por el MINAM, si no existiesen ECA nacionales.

El concepto de sitio contaminado puede incluir, en adición al suelo, otros componentes ambientales, como aguas subterráneas subyacentes o sedimentos, siempre y cuando estos se vean

antrópicas. El sitio potencialmente contaminado puede comprender el agua subterránea subyacente, los sedimentos u otros componentes ambientales, cuando estos resulten afectados por la presunta contaminación del suelo.

CONTAMINANTE

Cualquier sustancia química relacionada a actividades antrópicas susceptible de causar efectos nocivos para la salud de las personas o el ambiente.

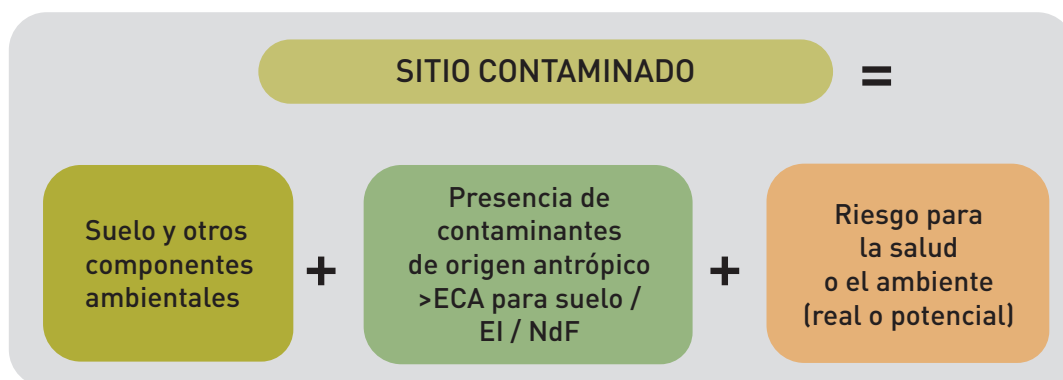
Fuente: Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados, aprobados por el Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM.

afectados por la presunta contaminación del suelo.

La definición de sitio contaminado implica que la contaminación puede representar un riesgo para la salud de las personas o la preservación del ambiente. En este sentido, el sitio contaminado representa siempre un riesgo potencial (por superar valores genéricos como los ECA) o real (riesgo comprobado a través de una ERSA) para las personas o los receptores ambientales (flora, fauna, etc.).

La ilustración 1 presenta los componentes implicados en la definición de un sitio contaminado en el Perú.

ILUSTRACIÓN 1. Sitio contaminado en el Perú: definición



EI = Estándares internacionales / NdF = Niveles de fondo

Fuente: Elaboración propia de acuerdo con los Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados, aprobados por el Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM.

Para enmarcarse en la definición dada, un sitio contaminado siempre debe contar con evidencias sobre la presencia de contaminantes en el suelo, es decir, que existen mediciones u otro tipo de pruebas que evidencian una superación de los ECA para suelo, los NdF o los estándares internacionales. En este sentido, no hay sitio contaminado si la contaminación en él no ha sido previamente comprobada.

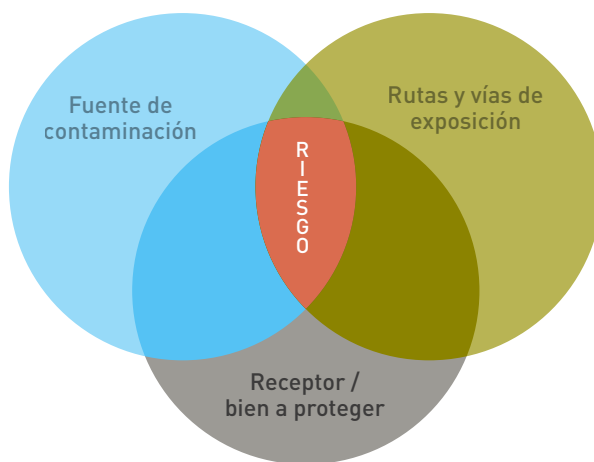
En cambio, si se tratase solo de sospechas o indicios que permiten presumir la presencia de contaminación en los suelos, por ejemplo por el tipo de actividad que se desarrolló en el sitio, se debe hablar de un sitio potencialmente contaminado hasta que se verifique la contaminación a través de un muestreo de suelos o por otras evidencias obtenidas en campo (por ejemplo, presencia de hidrocarburos en fase libre).

1.2. Enfoque integral de la gestión de riesgos en sitios contaminados

Los sitios contaminados, de acuerdo con la definición en el Perú (ver capítulo 1), son sitios que pueden representar riesgos para la salud de las personas o para la preservación del ambiente por la presencia de contaminantes en los suelos en concentraciones que superan los ECA para suelo, los NdF o los estándares internacionales, en el caso de parámetros no regulados. En este contexto, una situación de riesgo (potencial o real) por lo general ocurre cuando en el sitio contaminado están presentes tres elementos o componentes principales:

- ◆ Contaminación en el sitio, es decir, la presencia de sustancias químicas en determinadas concentraciones que pueden tener efectos nocivos para la salud de las personas o para el ambiente.
- ◆ Receptores humanos (moradores, trabajadores, niños, etc.), receptores ecológicos (plantas o animales) u otros bienes a proteger (por ejemplo, cuerpos

ILUSTRACIÓN 2. Riesgo en sitios contaminados: componentes



Elaboración propia.

de agua) que pueden sufrir daños por la contaminación en el sitio.

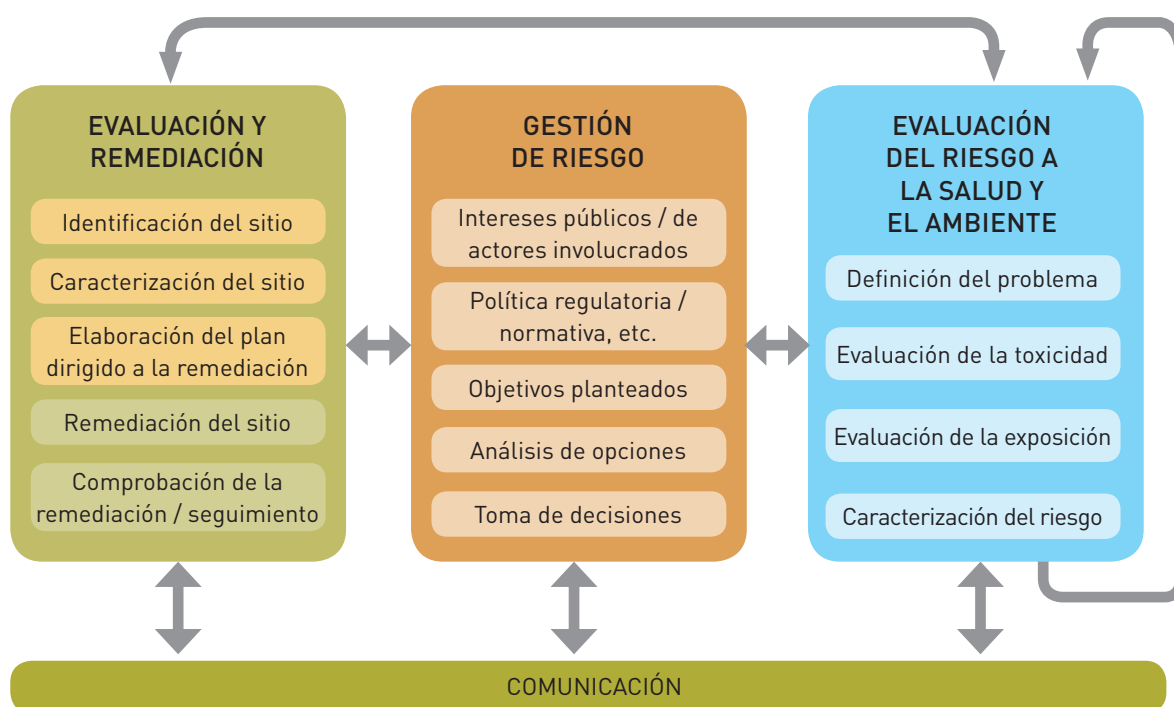
- ◆ Rutas y vías de exposición a través de las cuales los receptores o los bienes a proteger entren en contacto con la contaminación del sitio.

La ilustración 2 muestra esta situación en forma gráfica. El área en la que los tres componentes, la contaminación, los receptores y las rutas y vías de exposición, se superponen puede representar una situación de riesgo para la salud de las personas y/o la calidad del ambiente.

Este principio constituye también el fundamento para el desarrollo del modelo conceptual del sitio (MCS) (ver 1.7). Al respecto, cabe señalar que el MCS permite identificar los potenciales riesgos del sitio y que esta identificación es, por lo general, una evaluación cualitativa de los riesgos. Para cuantificarlos, y para determinar si estos riesgos son aceptables o no, puede requerirse un análisis más profundo a través del desarrollo de una ERSa, de acuerdo con los lineamientos establecidos en la guía para la elaboración de estudios de ERSa en sitios contaminados³ (MINAM, 2015).

Sin embargo, con independencia de si se desarrolla una ERSa en el sitio o no, debe considerarse el principio del riesgo en todas las fases

3. Resolución Ministerial N° 034-2015-MINAM

ILUSTRACIÓN 3. Riesgo en sitios contaminados: proceso de gestión integral

Nota. Los casilleros con fondo amarillo corresponden al alcance de la presente guía.

Fuente: elaboración propia con base en CCME, 2016a.

y las etapas de gestión del sitio contaminado.

Durante la evaluación del sitio (fases de identificación y de caracterización) se deben considerar los tres componentes y sus interrelaciones en el

desarrollo del muestreo ambiental con la finalidad de identificar los elementos críticos en el sitio.

A lo largo de la elaboración del PdR debe tomarse en cuenta el principio de riesgo en el diseño de las medidas de remediación, con el fin de adoptar acciones que permitan eliminar o reducir a niveles aceptables los riesgos que pueda generar el sitio contaminado a la salud de las personas o a la calidad del ambiente.

Por tanto, el principio de riesgo es un concepto fundamental para la evaluación y la remediación de un sitio contaminado, aunque la gestión de los riesgos identificados incluye una serie de aspectos adicionales que se deben entender en

conjunto como un proceso de gestión integral, cuyos elementos claves son:

- ◆ Evaluación y remediación del sitio
- ◆ Gestión de riesgos
- ◆ ERSA

La ilustración 3 muestra los elementos y sus interrelaciones en la gestión integral de riesgos en sitios contaminados. El enfoque de la presente guía es la evaluación y la remediación de sitios contaminados. Sobre la ERSA existe una guía específica⁴ (MINAM, 2015).

La gestión integral de riesgos en sitios contaminados requiere que el proceso de evaluación del sitio sea integrado con la evaluación y la gestión de los riesgos identificados.⁵ El muestreo que se desarrolle en el sitio debe permitir caracterizar la contaminación y satisfacer las necesidades de evaluación de los riesgos, y apoyar las decisiones respecto a la gestión

4. Guía para la elaboración de estudios de ERSA en sitios contaminados, aprobado mediante Resolución Ministerial N° 034-2015-MINAM

5. Así lo establecen guías sobre el tema como la del Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME).

de los riesgos identificados. Es importante que esta planificación empiece en un estado temprano de la evaluación del sitio para evitar que se genere información insuficiente, lo que puede demandar el desarrollo de muestreos adicionales.

1.3. Actores involucrados y comunicación

Un aspecto clave para una exitosa gestión de un sitio contaminado es el apoyo de los actores involucrados, porque permite desarrollar y trabajar en conjunto hacia objetivos comunes.

A pesar de que, el enfoque de la presente guía es proporcionar lineamientos y criterios técnicos para la evaluación de sitios contaminados, se debe destacar la importancia de identificar e involucrar a los actores relevantes desde la planificación de la gestión del sitio contaminado.

Es usual que los actores relevantes sean diferentes en cada caso; sin embargo, típicamente se incluyen las siguientes personas y entidades:

- ◆ Autoridades competentes: en la gestión de un sitio contaminado intervienen usualmente varias autoridades con diferentes ámbitos de competencia, funciones y jurisdicciones.
- ◆ Responsables del sitio contaminado o encargados de la remediación: incluyendo sus representantes como gestores del sitio, abogados, etc.
- ◆ Expertos en comunicación del riesgo.
- ◆ Comunidad y otros actores: población afectada, pueblos indígenas, agencias de salud, organizaciones no gubernamentales de desarrollo (ONGD), etc.

Los actores pueden tener distintas perspectivas sobre la definición del problema y acerca de la lista de posibles opciones o métodos para evaluarlo (Adler & Kranowitz, 2005). Es mejor identificar estos diferentes puntos de vista durante la planificación de la gestión del sitio contaminado y no después de comunicar los resultados de la evaluación del sitio. Esas diferencias pue-

LAS SIETE REGLAS DE ORO PARA LA COMUNICACIÓN DEL RIESGO

1. Acepta e involucra al público como un socio legítimo.
2. Planifica con cuidado y evalúa tus esfuerzos.
3. Escucha las preocupaciones específicas del público.
4. Sé honesto, franco y abierto.
5. Coordina y colabora con otras fuentes confiables.
6. Cumple con las necesidades de los medios de comunicación.
7. Habla claro y con empatía.

Fuente: United States Environmental Agency (US EPA), 1988

den resultar de percepciones distintas sobre los riesgos asociados al sitio contaminado, las que pueden basarse en hechos concretos producto de la experiencia, preocupaciones, miedos, sentimientos de desigualdad o desconfianza entre los actores.

Las autoridades competentes y los responsables se apoyan de consultores y expertos técnicos que por lo general constituyen equipos multidisciplinarios con geólogos, hidrogeólogos, químicos, ingenieros, evaluadores ambientales, etc.

En este contexto, se debe destacar la importancia de una adecuada comunicación entre las diferentes autoridades involucradas, y entre ellas y los responsables de la evaluación o la remediación del sitio. En muchos casos es este un factor crucial para el éxito de la gestión de un sitio contaminado.

Un aspecto particular y de alta relevancia es la adecuada comunicación del riesgo, que forma parte integral del proceso de gestión de riesgos en sitios contaminados.

Como sostiene la *United States Environmental Protection Agency* (US EPA), la comunicación del riesgo suele incluir varios actores potencialmente en riesgo por la contaminación del sitio, o que tienen interés en el sitio por otros

motivos. Los diferentes elementos que forman parte de todo el proceso de comunicación del riesgo pueden tener distintos objetivos (US EPA, 2007a).

En general, la comunicación del riesgo es un proceso iterativo en el cual se informa sobre las decisiones de evaluación y gestión de los riesgos del sitio (ver 1.2).

De acuerdo con entidades especializadas⁶, el objetivo de la comunicación del riesgo es la comprensión común de todos los actores de los procesos y los supuestos que se utilizan en la evaluación del riesgo. Sin embargo, en muchos casos, no se pueden evitar problemas en la comunicación del riesgo, los que, no obstante, se pueden minimizar (ITRC, 2015).

El alcance de la presente guía no permite detallar las posibles estrategias y herramientas disponibles que apoyan la comunicación del riesgo al público. Al respecto, existen diversas publicaciones que abordan el tema de una comunicación efectiva del riesgo⁷.

1.4. Aseguramiento y control de calidad

Un aspecto fundamental para la evaluación es la calidad de los datos, la cual se garantiza con un plan sobre aseguramiento de la calidad, indicadores sobre la calidad de los datos y medidas de control.

1.4.1. LA CALIDAD DE LOS DATOS

Para todo proceso de evaluación de un sitio es fundamental contar con datos de calidad que permitan alcanzar los objetivos y las metas

planteados en esa evaluación. La calidad de los datos debe entenderse en sentido muy amplio al incluir todos los elementos que influyen en el proceso de evaluación del sitio.

El rango de elementos a considerar va desde el desarrollo del MCS inicial, pasando por la identificación de metas y objetivos de la evaluación, hasta las fases de planificación más detalladas de la gestión de un sitio contaminado; entre ellas el diseño del muestreo y la determinación de las técnicas para la toma de muestras y los métodos analíticos apropiados⁸.

De forma más específica, la calidad de los datos puede verse como una de las características que influye en el cumplimiento de las metas y los objetivos de la gestión de un sitio contaminado con base en el uso previsto de los datos.

La calidad de los datos es mucho más que la exactitud y la precisión analítica, ya que involucra todos los aspectos del proceso de evaluación del sitio: determinación de la ubicación de los puntos de muestreo, número de muestras, momento del muestreo, técnicas de muestreo, parámetros analíticos, manejo de las muestras y métodos analíticos.

Un concepto clave es que el objetivo de la evaluación permita obtener datos representativos que posibiliten la toma de decisiones basada en información sólida. La toma de muestras no representativas puede resultar en datos erróneos, incluso si la calidad analítica de estos datos ha sido prácticamente perfecta.

La generación de datos representativos se encuentra estrechamente vinculada al diseño del muestreo, lo que involucra consideraciones sobre la escala y la frecuencia de análisis de

6. Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC) de Estados Unidos de América (EUA)

7. Entre estas se pueden citar la que aborda las siete reglas de oro para la comunicación del riesgo (US EPA, 1988), o las guías del US EPA (2007b), de Adler y Kranowitz (2005) y del ITRC (2015: Sección 9).

8. Los métodos de ensayo normalizados, vigentes y acreditados por el Instituto Nacional de Calidad (Inacal) u organismo de acreditación internacional reconocido por el Inacal, en el marco del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo de la *International Laboratory Accreditation Cooperation* (ILAC) o el Acuerdo de Reconocimiento Multilateral de la *Inter American Accreditation Cooperation* (IAAC).

TABLA 1. Plan de aseguramiento de la calidad de un estudio de evaluación de sitios contaminados: componentes

Acreditación y capacitación

- ◆ Acreditación requerida para el laboratorio analítico, acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (Inacal) u organismo de acreditación internacional, reconocido por el Inacal, en el marco del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo de la International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) o el Acuerdo de Reconocimiento Multilateral de la Inter American Accreditation Cooperation (IAAC).
- ◆ Acreditación requerida y capacitación especializada para el personal de campo; por ejemplo, certificados de salud y seguridad, manejo de equipos, métodos de muestreo.

Técnicas de muestreo

- ◆ Plan de muestreo.
- ◆ Metodología de muestreo y equipamiento.
- ◆ Procesos / equipos para la descontaminación de los materiales de muestreo.

Equipos / instrumentos de campo

- ◆ Tipo del instrumento y especificación del modelo.
- ◆ Requerimientos para la calibración y la documentación de los equipos.
- ◆ Inspección de los instrumentos y de los requerimientos de mantenimiento.
- ◆ Documentación de la calibración e inspección de los instrumentos.
- ◆ Descontaminación o limpieza de los materiales y equipos de muestreo.

Manejo de muestras, custodia y análisis

- ◆ Protocolos analíticos.
- ◆ Contenedores para las muestras.
- ◆ Requerimientos para la preparación de las muestras en campo.
- ◆ Requerimientos para la conservación de las muestras; por ejemplo, tipo de almacenamiento, temperatura, tiempos máximos de conservación.
- ◆ Cadena de custodia. Muy importante; usar etiquetado y terminología consistente en la cadena de custodia y en los contenedores de las muestras.
- ◆ Metas para la calidad de los datos; por ejemplo, límites de detección, límites de cuantificación, precisión y exactitud del método analítico.
- ◆ Muestras para el control de calidad de las labores en campo; por ejemplo, muestras duplicadas, blancos de campo.
- ◆ Muestras para el control de calidad de laboratorio; por ejemplo, muestras duplicadas, blancos de método, estándares o materiales de referencia certificados.
- ◆ Número y, eventualmente, periodicidad para el análisis de las muestras de control.
- ◆ Otras medidas para evaluar la calidad; por ejemplo, auditorías, pruebas entre laboratorios.

Documentación y almacenamiento de registros

- ◆ Identificación del *software* y del *hardware* de las computadoras de campo.
- ◆ Requerimientos para la documentación en campo; por ejemplo, bitácoras, fichas de campo, registros fotográficos.
- ◆ Procedimientos para el almacenamiento y el archivo de los datos de campo.
- ◆ Procedimientos para la transferencia de datos del laboratorio.
- ◆ Procedimientos aplicables para la seguridad de los datos.

Validación de los datos

- ◆ Comprobación de errores de transcripción y manipulación.
- ◆ Revisión de parámetros del PACal.
- ◆ Revisión de indicadores de control de calidad con respecto a los objetivos de calidad de los datos y de criterios de aceptación para los métodos analíticos.

TABLA 2. Plan de aseguramiento de la calidad de un estudio de evaluación de sitios contaminados: indicadores de la calidad de los datos

Indicador de la calidad de los datos	Definición y cuantificación	Ejemplos de métodos
Precisión	<p>Es el nivel de concordancia entre mediciones repetidas del mismo parámetro bajo condiciones idénticas o similares, el cual se cuantifica como la diferencia relativa porcentual (DRP):</p> $\text{DRP (\%)} = (C1 - C2) / [(C1 + C2) / 2] * 100$ <p>C1 = Concentración determinada en la primera medición C2 = Concentración determinada en la segunda medición</p>	<p><i>Análisis repetidos de la misma muestra:</i> mide la variabilidad en la preparación de la muestra y el método analítico.</p> <p><i>Dividir una muestra en campo y analizar ambas muestras:</i> mide la variabilidad por la división de la muestra, el manejo de la muestra e influencias relacionadas con el laboratorio.</p> <p><i>Tomar dos muestras cúbicas (cercanas) y analizarlas:</i> mide la variabilidad de la escala local, de la obtención y del manejo de la muestra, y la variabilidad del laboratorio.</p>
Exactitud	Es la concordancia total de una medición con relación a un valor conocido; incluye errores aleatorios (precisión) y sistemáticos (sesgo).	Analizar un material de referencia o volver a analizar una muestra a la cual se ha agregado una sustancia en concentraciones conocidas; usualmente se expresa como recuperación porcentual o sesgo porcentual.
Sesgo (bias)	<p><i>Es el grado de error sistemático que existe respecto a un valor verdadero.</i></p> $\% \text{ de sesgo} = \% \text{ de recuperación} - 100$ $\% \text{ de sesgo} = (C - C_{\text{Estándar}}) / C_{\text{Estándar}}$	Usar materiales referenciales o muestras de matrices dotadas.
Representatividad	Las muestras de datos son partes de la población, pero no son la población completa. Por ello, sus características no suelen coincidir con las de la población. La medida en que la muestra de datos se aproxima a la población se denomina representatividad.	Evaluar si las muestras recolectadas y las mediciones realizadas reflejan en forma adecuada las características que se han medido o investigado.
Comparabilidad	Describe si diferentes conjuntos de datos pueden ser considerados equivalentes con base en un objetivo común.	Comparar para diferentes conjuntos de datos la recolección y el manejo de muestras, protocolos analíticos, límites de detección, límites de cuantificación y resultados del control de calidad (por ejemplo, grado de recuperación o comparación con materiales de referencia).
Complejidad	Describe el grado en el que se generan datos válidos.	Comparar el número de mediciones válidas (muestras recolectadas y muestras analizadas) con los objetivos de calidad específicos del estudio.

Fuente: elaboración propia con base en CCME, 2016a.

las muestras. Debe buscar disminuir la incertidumbre a un grado tolerable a través de un diseño del muestreo que sea compatible con los objetivos de la evaluación.

Las fuentes de incertidumbre de los datos se deben entender y comunicar al evaluador de los resultados. Igualmente, debe tomarse en cuenta que los datos pueden tener una gran variabilidad, un hecho que es inherente en los sitios contaminados, puesto que en muchos casos presentan condiciones complejas.

1.4.2. PLAN DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

Cada estudio de evaluación de un sitio contaminado debe contar con un plan de aseguramiento de la calidad (PACal), el cual debe entenderse como el plan integral para conseguir la calidad de los datos que se obtienen durante el muestreo y el análisis químico de las muestras. El PACal identifica todos los aspectos del programa de evaluación del sitio que pueden influir sobre la calidad de los datos. Muchos de estos son específicos para el medio (componente) ambiental o el método a aplicarse y, por eso, resulta fundamental que se sigan en detalle los protocolos de calidad correspondientes (US EPA, 2002a).

Un PACal contiene un mínimo de componentes (tabla 1). Contenido que está en función del alcance de la gestión de un sitio contaminado y de las técnicas y los métodos que se aplicarán en campo y en el laboratorio, por lo cual variará para cada estudio.

1.4.3. INDICADORES DE LA CALIDAD DE LOS DATOS

La calidad y los criterios de aceptación de los datos se expresan con frecuencia como *indicadores de la calidad de los datos*, los principales son: la precisión, la exactitud, la representatividad, la comparabilidad y la completitud. En la tabla 2 se presentan definiciones y ejemplos de métodos para la determinación de los principales indicadores.

1.4.4. MEDIDAS PARA EL CONTROL DE CALIDAD

El control de calidad consta de una serie de actividades técnicas que se utilizan para medir o evaluar los efectos de errores o de la variabilidad en el muestreo y el análisis químico. Asimismo, puede incluir la especificación de criterios de aceptación para los datos y las acciones correctivas que se aplican si se exceden estos criterios.

Este paso incluye chequeos que se realizan para evaluar la calidad analítica del laboratorio, para establecer la influencia combinada del muestreo en campo y el análisis en laboratorio, y para determinar específicamente el potencial de contaminación cruzada durante el muestreo y el manejo de las muestras.

Chequeos y muestras de control de calidad

Las principales actividades para el control de la calidad en campo y en laboratorio de las muestras de chequeo se presentan a continuación (CCME, 2016a). En primer lugar, en laboratorio:

- ◆ Calibración de los instrumentos de medición; por ejemplo, ajuste de espectrómetros de masa.
- ◆ Blancos de métodos: se procesa una muestra limpia de forma simultánea y bajo las mismas condiciones (por ejemplo, con los mismos reactivos y solventes) que las muestras que se busca analizar. Se hace para confirmar si el instrumento, los reactivos y los solventes usados se encuentran libres de contaminantes.
- ◆ Duplicados de laboratorio: se analizan dos muestras del mismo recipiente de muestras. Se hace para evaluar la precisión del laboratorio.
- ◆ Muestras enriquecidas con un sustituto (*surrogate spike samples*): se agrega a la muestra con concentraciones conocidas del analito objetivo una masa conocida de un compuesto que no se encuentra en la naturaleza (por ejemplo, compuestos deu-

terados como tolueno-d8) pero tiene iguales características que el compuesto que se analizará. Se utiliza para evaluar la eficiencia de la recuperación analítica.

- ◆ Muestras de matriz enriquecidas (*matrix spike samples*): a una muestra de matriz con concentraciones conocidas se agrega una masa conocida del analito objetivo. Este método se emplea para evaluar la influencia de la matriz sobre la eficiencia de recuperación de un método de ensayo.
- ◆ Estándares o materiales de referencia certificados: se analizan materiales de referencia en los cuales el contenido o la concentración del analito objetivo ha sido determinado con muy alto grado de certidumbre (por lo general, por una agencia reguladora nacional o internacional). Sirve para evaluar la exactitud de la medición.

Los principales controles de calidad en campo son:

- ◆ Duplicados de campo: se envía al laboratorio muestras divididas o colocadas (ubicadas en inmediata cercanía), las cuales se han obtenido en campo con el mismo procedimiento de muestreo que la muestra original. La clave reside en que la muestra duplicada no debe mostrar que lo es («muestras ciegas»). Se utiliza para evaluar la precisión del muestreo y del análisis químico.
- ◆ Blanco viajero (*trip blanks*): se transporta una muestra de la misma matriz que se analizará del laboratorio al sitio bajo estudio y al revés. Se utilizarán contenedores iguales a los de las muestras a analizar. Los recipientes de las blanco viajero no deben abrirse durante su transporte. Se utiliza para evaluar si durante el transporte y el almacenamiento de la muestra ocurrió una contaminación cruzada.
- ◆ Blanco de equipo (*equipment blanks*): este tipo de muestra se prepara en campo donde, por ejemplo, se pasa aire o agua libre de contaminación (agua destilada/desionizada) por un dispositivo de muestreo (por

ejemplo, bombas o tuberías). Se utiliza para evaluar los procedimientos de descontaminación de los equipos de muestreo.

- ◆ Blanco de campo: se usa una muestra limpia, por ejemplo, agua destilada/ desionizada, la que se expone al contenedor de la muestra en las condiciones del muestreo (por ejemplo, remover la capa del contenedor) o al aire ambiental en el lugar del muestreo. Se utiliza para identificar contaminantes que pueden introducirse durante la recolección, el almacenamiento y el transporte de la muestra.

Es recomendable que los chequeos de control en campo se realicen en un estado temprano del proceso de evaluación del sitio, puesto que, de ser necesarios, permiten hacer ajustes al muestreo.

Recomendaciones sobre la frecuencia mínima de muestras para el control de calidad

La frecuencia mínima recomendada para el análisis de duplicados de laboratorio es una (1) en veinte (20) muestras, y una (1) en diez (10) muestras para duplicados de campo (CCME, 2016a).

Para pequeños programas de muestreo en los que se analizan menos de 20 muestras debe considerarse como mínimo el análisis de una muestra duplicada.

De ser posible, las muestras duplicadas deben contar con un nivel de contaminación suficientemente alto para evaluar la precisión de la medición. No es viable evaluar la precisión de la medición cuando la concentración del contaminante está cerca al límite de detección del método analítico.

Objetivos de la calidad de los datos

En el PACal se definen los objetivos de la calidad de los datos o conocer la precisión y la exactitud que puedan alcanzarse basadas en el método analítico y la matriz que se ponen a prueba; así como, otros indicadores de calidad de datos, de corresponder.

La determinación de los criterios objetivos de aceptación de las muestras de control de la calidad es un proceso complejo cuya descripción detallada superaría el alcance de la presente guía. Sin embargo, se considera pertinente que los evaluadores consideren los lineamientos aceptados en el ámbito internacional en esta materia⁹.

Por su parte, los laboratorios establecen sus propios criterios de aceptación, los cuales varían con base en los requisitos de rendimiento del protocolo analítico que se aplique. Los criterios de aceptación son factores que se consideran en el proceso de acreditación de un método de ensayo ante la entidad acreditadora (en el caso del Perú, el Inacal).

Por lo general, las tolerancias permitidas para suelos son mayores que para aguas subterráneas, debido a la variabilidad introducida por la matriz. De forma similar, los rangos para recuperaciones aceptables son ligeramente mayores para compuestos semivolátiles que para compuestos volátiles (CCME, 2016a).

Los objetivos de calidad de los datos se deben comparar con las especificaciones de funcionamiento del método analítico. El *límite de cuantificación* (LC) reportado por el laboratorio es un requisito básico de la calidad de datos, y su objetivo debe determinarse idealmente con un factor de 5 a 10 veces menor que el criterio de regulación; por ejemplo, los ECA para suelo¹⁰.

Recomendaciones sobre criterios de aceptación de muestras duplicadas

Las campañas de muestreo deben incluir tanto muestras duplicadas de laboratorio como de campo. El criterio de aceptación depende del protocolo analítico y del medio de la muestra (componente ambiental). A continuación, se proporcionan recomendaciones respecto a los criterios de aceptación que pueden aplicarse a

los analitos más comunes (hidrocarburos extraíbles, metales, compuestos volátiles y semivolátiles), en concordancia con recomendaciones establecidas por normas internacionales como la norma canadiense (CCME, 2016a).

En los parámetros inorgánicos en muestras duplicadas de laboratorio para la matriz agua (subterránea o superficial) se recomienda una DRP menor al 20 %. Para muestras de suelos es pertinente una DRP un poco más alta, del orden del 30 %, debido a la mayor variabilidad de matriz en este medio.

En muestras duplicadas de campo se debe tener en consideración que la variabilidad es generalmente mayor por la diversidad que introducen la matriz, el proceso de muestreo y el manejo de las muestras. No cabe duda de que es una cuestión de juicio cuantificar la «precisión aceptable», sin embargo, se puede asumir que el error de campo y el de laboratorio están en el mismo orden de magnitud; en consecuencia, los criterios de aceptación resultarían dos veces más altos que los valores señalados para los duplicados de laboratorio. En otras palabras, para duplicados de campo se recomienda una DRP menor al 40 % para muestras de agua y menor al 60 % para muestras de suelo.

El criterio de aceptación debe ser menos estricto para concentraciones cerca de los límites de detección. Por ejemplo, si las concentraciones en las muestras duplicadas están cinco veces por debajo del LC se puede aplicar como criterio de aceptación una diferencia de concentraciones de hasta dos veces del LC (tabla 3). Por otro lado, si se excediesen los criterios de aceptación se revisan los procedimientos del muestreo y examinar las matrices analizadas (suelo o agua). Una precisión reducida es aún más importante cuando las concentraciones se encuentran cerca del valor regulatorio (por ejemplo, el ECA para suelo).

9. En documentos como la guía estadounidense (US EPA, 2006) o la guía canadiense (CCME, 2016a: Vol. 4).

10. Un ejemplo de definición de los objetivos de calidad de los datos podría ser: «El método de medición seleccionado para el estudio debe permitir detectar la presencia de los compuestos X, Y y Z en suelos con un LC de 0,1 mg/kg y un rango de recuperación del 70 al 130 % (relativo a un material de referencia certificado) y una precisión cuantificada como DRP menor al 30 %».

TABLA 3. Determinación del cumplimiento de aceptación para muestras duplicadas: ejemplo práctico

En el marco del muestreo de suelos en un sitio potencialmente contaminado con plomo (Pb) se tomaron para fines de control de la calidad dos muestras duplicadas en campo (muestras A y B). En el siguiente cuadro se muestran los resultados analíticos reportados por el laboratorio.

Muestras de suelo para el control de la calidad		Pb (mg/kg)
Muestra duplicada A	A1	112,0
	A2	82,0
Muestra duplicada B	B1	1,2
	B2	0,6
Límite de cuantificación		0,5

A continuación se señalan los criterios de aceptación establecidos para el estudio y el cálculo de cumplimiento de estos criterios para las muestras duplicadas A y B.

Criterios de aceptación		Muestra A	Muestra B
Criterio 1 La DRP entre las muestras duplicadas debe ser menor al 60 %	$DPR = (C1 - C2) / [(C1 + C2) / 2] * 100$ <p>DPR < 60 %</p> <p>C1 = Concentración del analito en la muestra 1 C2 = Concentración del analito en la muestra 2</p>	$DPR = (112 - 82) / [(112 + 82) / 2] * 100 = 31 \%$ <p>31 % < 60 %</p> <p>CUMPLE</p>	$DPR = (1,2 - 0,6) / [(1,2 + 0,6) / 2] * 100 = 67 \%$ <p>67 % > 60 %</p> <p>NO CUMPLE</p>
Criterio 2 Para concentraciones cinco veces menores al LC la diferencia entre las muestras duplicadas debe ser menor que dos veces el LC	<p>C1 y C2 < 5 x LC</p> <p>$\Delta (C1 - C2) < 2x LC$</p> <p>C1 = Concentración del analito en la muestra 1 C2 = Concentración del analito en la muestra 2</p>	<p>5 x LC = 5 x 0,5 mg/kg = 2,5 mg/kg</p> <p>A1 {112 mg/kg} y A2 {82 mg/kg} >> 2,5 mg/kg</p> <p>No se aplica el criterio</p>	<p>5 x LC = 5 x 0,5 mg/kg = 2,5 mg/kg</p> <p>B1 {1,2 mg/kg} y B2 {0,6 mg/kg} < 2,5 mg/kg</p> <p>Se aplica el criterio</p> <p>$\Delta (B1 - B2) = (1,2 - 0,6) = 0,6 \text{ mg/kg}$</p> <p>2 x LC = 1 mg/kg</p> <p>0,6 mg/kg < 1 mg/kg</p> <p>CUMPLE</p>

Como se puede observar, la muestra duplicada A cumple con el criterio 1 porque la DRP de los dos duplicados es menor al 60 %. Por otro lado, es importante reconocer que el criterio 2 no se aplica porque las concentraciones de plomo en las muestras A1 y A2 no se encuentran cerca del LC.

En el caso de la muestra B, se observa que no cumple con el criterio 1. Sin embargo, dado que las concentraciones de las muestras B1 y B2 se encuentran cerca del LC, se aplica el criterio 2, con el cual se cumplen los resultados obtenidos para las muestras duplicadas B1 / B2.

En resumen, se determinó que las dos muestras duplicadas (A y B) cumplen con los objetivos de control de calidad establecidos para el estudio.

1.5. Fases de gestión de un sitio contaminado

De acuerdo con la normativa vigente, la gestión de un sitio potencialmente contaminado o de un sitio contaminado se realiza por fases. Este enfoque permite una gestión eficiente y eficaz de los sitios bajo estudio. La idea principal es que el proceso de evaluación de un sitio puede terminar al final de alguna fase, siempre y cuando los resultados de esta fase lo indiquen. De esa forma, pasan a la siguiente fase solamente los sitios que realmente lo requieran.

Se distinguen las siguientes fases de gestión de un sitio:

- 1) Fase de identificación
- 2) Fase de caracterización
- 3) Fase de elaboración del PdR
- 4) Fase de remediación

La presente guía solo orienta sobre el desarrollo de las tres primeras fases de la gestión de un sitio. En la cuarta fase, de remediación, se ejecutan las medidas de remediación propuestas en el PdR y se realiza la comprobación de la remediación y de las acciones de monitoreo posremediación, en caso corresponda.

En la ilustración 4 se presenta un resumen de las fases y las etapas de gestión de un sitio, los objetivos de cada fase y la denominación de los informes que deben elaborarse al final de cada fase.

Las tres secciones siguientes a la presente (ver 1.6 a 1.8) brindan indicaciones generales sobre el desarrollo de las evaluaciones en sitios potencialmente contaminados y en sitios contaminados, aplicables tanto para la fase de identificación como para la de caracterización, a las que más adelante (ver capítulos 2 y 3) se

añadirán indicaciones específicas para cada una de estas fases.

1.6. Definición de los objetivos del estudio de evaluación

El punto de partida del estudio de evaluación es la definición de sus objetivos generales y específicos.

1.6.1. OBJETIVO GENERAL

La planificación de un estudio de evaluación en un sitio potencialmente contaminado o contaminado se inicia determinando el objetivo general del estudio. Para ello es esencial definir, con base en la información disponible sobre el sitio, el problema existente o potencial al que debe responder la evaluación prevista¹¹.

Para la definición del objetivo general del estudio deben identificarse los antecedentes del sitio y otra información relevante, como:

- ◆ Definición del «sitio» (límites geográficos, tamaño, topografía, etc.).
- ◆ Usos anteriores, actuales y previstos del sitio.
- ◆ Requerimientos legales y regulatorios.
- ◆ Limitaciones que podrían influir en la evaluación del sitio, lo que incluye aspectos financieros o de acceso, entre otros.
- ◆ Actores involucrados.
- ◆ Tipos de decisiones que se deben tomar.

Con base en la definición del problema y de la información disponible del sitio se establece el objetivo general de la evaluación, el cual debe resumir la finalidad principal del estudio¹².

11. Un ejemplo de definición del problema en un sitio contaminado por hidrocarburos podría ser: «En la fase de identificación de un sitio de uso comercial se ha encontrado contaminación del suelo y del agua subterránea por hidrocarburos de tipo diésel y combustible. La presunta fuente de la contaminación son dos antiguos tanques subterráneos. La extensión de la contaminación no ha sido delimitada aún. Tampoco se ha evaluado si la contaminación ha migrado fuera del sitio».
12. En el ejemplo anterior del sitio contaminado por hidrocarburos, el objetivo general podría ser: «El objetivo general de la evaluación del sitio es generar la información necesaria para realizar una evaluación del riesgo para la salud y para el ambiente en el sitio».

ILUSTRACIÓN 4. Gestión del riesgo de un sitio contaminado en el Perú: fases, objetivos principales e informes a elaborar



Elaboración propia.

* Atenuación natural monitoreada

** No forma parte de la presente guía

**TABLA 4. Objetivos específicos de un estudio de evaluación:
tipos de problemas de decisión y de estimación**

Problemas de decisión	Problemas de estimación
¿Excede la concentración de un contaminante los ECA para suelo?	¿Cuál es la tasa de migración de un contaminante en un acuífero y cuál el tiempo hasta que este llegue a un receptor?
¿Representa la concentración de un contaminante, encontrado en el suelo superficial o en una profundidad específica, un riesgo para la salud humana?	¿Está la fase libre de un líquido no acuoso más denso que el agua (DNAPL, por su sigla en inglés) móvil?
¿Está la concentración de un contaminante en el agua subterránea de una unidad hidrogeológica específica significativamente sobre los NdF?	¿Cuál es la variación temporal de las concentraciones de contaminantes en la fase gaseosa del suelo cerca de un edificio?

Fuente: Elaboración propia basada en CCME, 2016a.

La planificación inicial del estudio involucra también la formación de un equipo de trabajo. Usualmente, estos equipos son multidisciplinarios, integrados por especialistas en hidrogeología, muestreo ambiental, química, estadística y evaluación de riesgos, entre otros, en función de cada caso concreto y según lo contemple el sector competente.

1.6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El próximo paso de la planificación es determinar los objetivos específicos de la evaluación, los cuales deben ser más detallados y concretos que el objetivo general. Para muchos sitios, se pueden aplicar los siguientes objetivos específicos:

- ◆ Determinar el tipo de los contaminantes en el sitio, considerando los diferentes componentes ambientales (suelo, agua subterránea, fase gaseosa del suelo, etc.).
- ◆ Desarrollar un estudio de la geología y la hidrogeología del sitio.
- ◆ Delimitar la extensión y la profundidad de la contaminación en los diferentes componentes ambientales afectados (suelo, agua subterránea, fase gaseosa del suelo, etc.).
- ◆ Caracterizar la migración actual y potencial de los contaminantes.
- ◆ Obtener datos para identificar y evaluar los efectos adversos actuales y potenciales que

genera la contaminación del sitio para la salud de las personas y para el ambiente.

Los objetivos de la evaluación deben ser lo más específicos posible. En general, los objetivos específicos pueden corresponder a dos categorías: problemas de decisión y problemas de estimación (tabla 4).

1.7. Modelo conceptual del sitio

Con los resultados encontrados se puede emprender la elaboración del modelo conceptual del sitio (MCS).

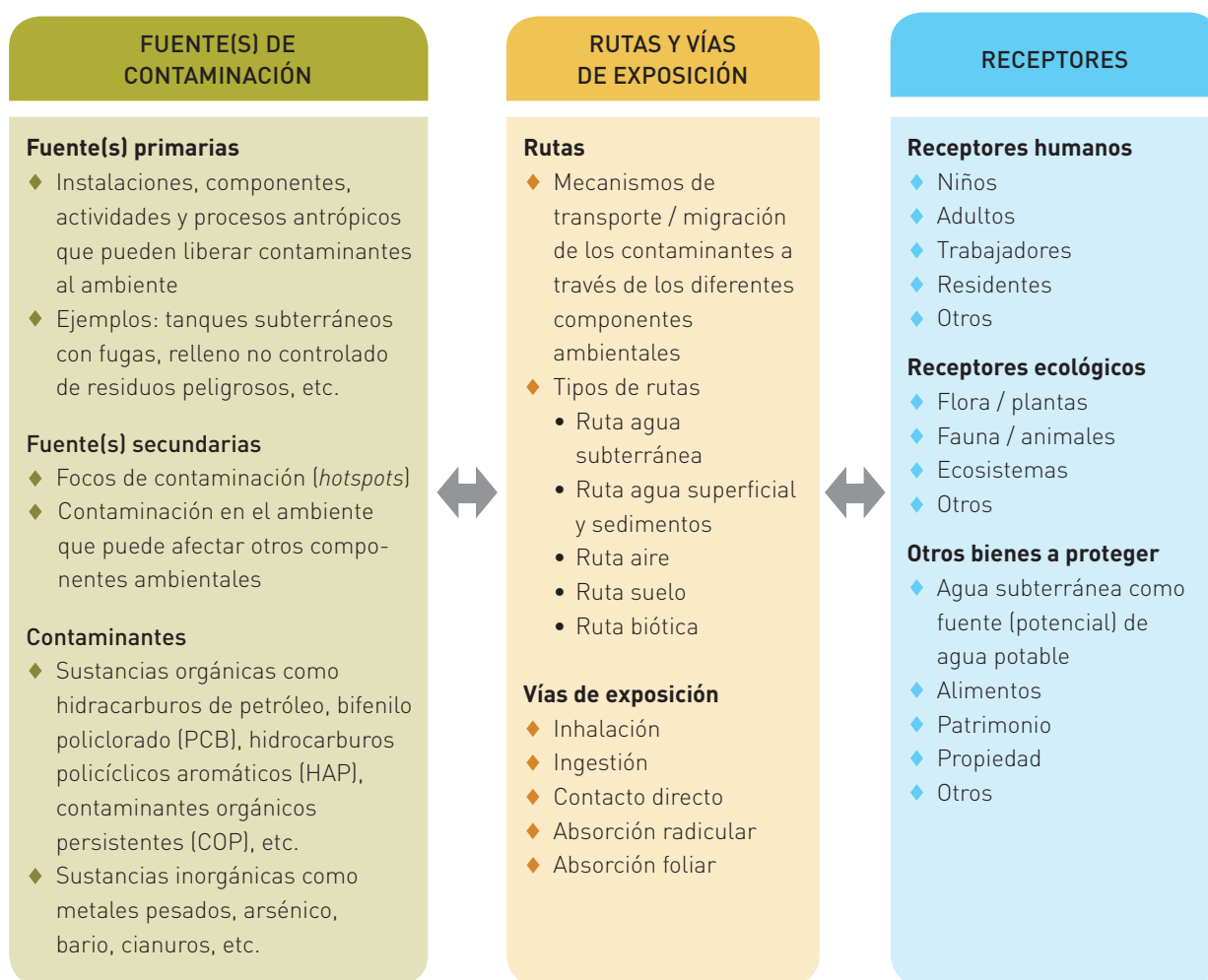
1.7.1. DEFINICIÓN Y DESARROLLO

El MCS puede entenderse como un esquema que describe los elementos principales del sitio contaminado y las interrelaciones entre estos (ver recuadro). Existen diferentes maneras de elaborarlo: puede ser una descripción gráfica o una descripción esquemática o narrativa de la situación y de los problemas identificados.

El modelo conceptual incluye tres elementos principales: las fuentes de contaminación, las rutas y vías de exposición y los receptores (ilustración 5).

El MCS se elabora al inicio de un estudio de evaluación de un sitio potencialmente contaminado o contaminado, y se desarrolla basado

ILUSTRACIÓN 5. Modelo conceptual del sitio contaminado: componentes



Elaboración propia.

en la información disponible sobre el sitio, considerando posibles y potenciales fuentes,

Definiciones

MODELO CONCEPTUAL

Relato escrito y/o representación gráfica del sistema ambiental y de los procesos físicos, químicos y biológicos que determinan el transporte de contaminantes desde las fuentes de contaminación hasta los potenciales receptores, a través de los componentes ambientales que forman parte de dicho sistema.

Fuente: Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados, aprobados por el Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM.

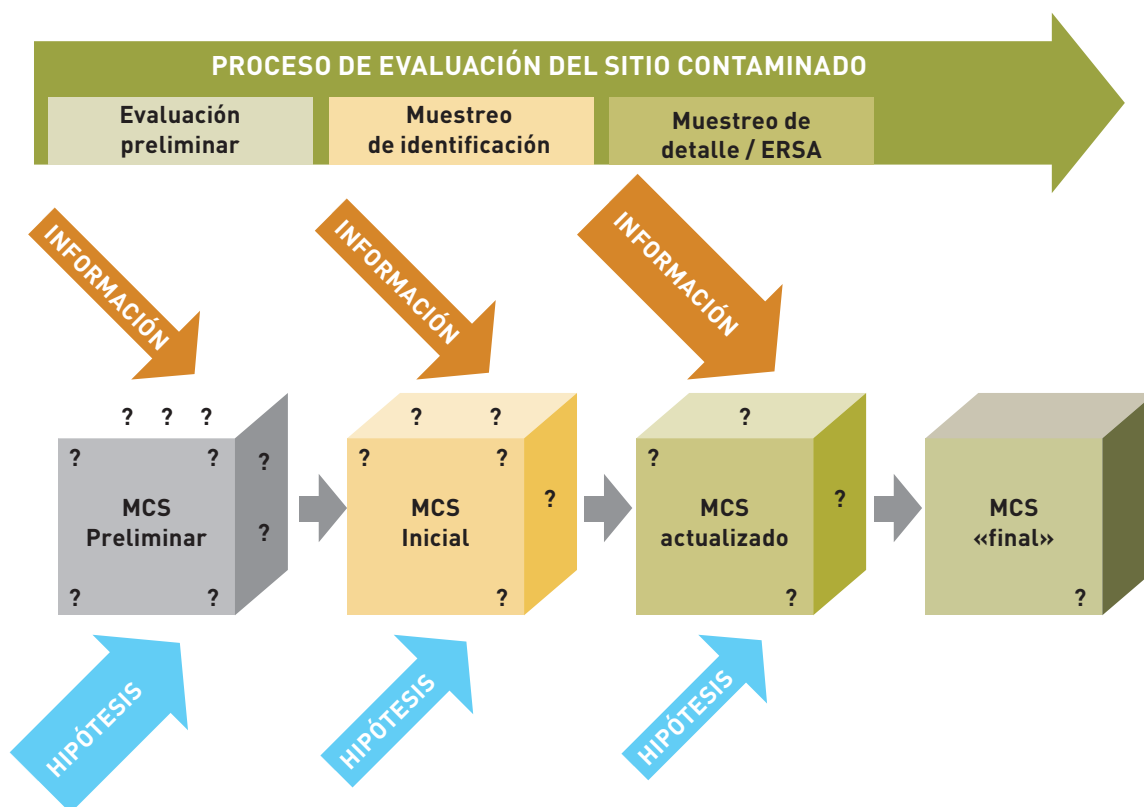
receptores y rutas/vías de exposición. En este sentido, representa una hipótesis acerca de la contaminación del sitio y de las posibles afecta-

ciones de la contaminación sobre las personas y el ambiente.

Durante la evaluación del sitio, el MCS se retroalimenta con la nueva información obtenida para complementar los conocimientos sobre su contaminación, los receptores, las rutas de migración de los contaminantes y las vías de exposición supuestos inicialmente.

Así, se van comprobando y descartando las hipótesis iniciales con el objetivo de afinar el MCS para que se acerque a la realidad del sitio, sobre la base de información confiable y comprobada. Por tanto, su desarrollo es un proceso iterativo y al final de cada etapa se evalúa si las incertidumbres resultantes están en niveles aceptables, o si se requiere el levantamiento de información adicional en la próxima etapa

ILUSTRACIÓN 6. Modelo conceptual del sitio contaminado: proceso de evaluación



Elaboración propia.

de evaluación. Por ende, el MCS no es un esquema estático del sitio, sino una herramienta dinámica que evoluciona a lo largo del proceso de evaluación del sitio (ilustración 6).

Se debe destacar que el MCS puede usarse para diferentes propósitos, como:

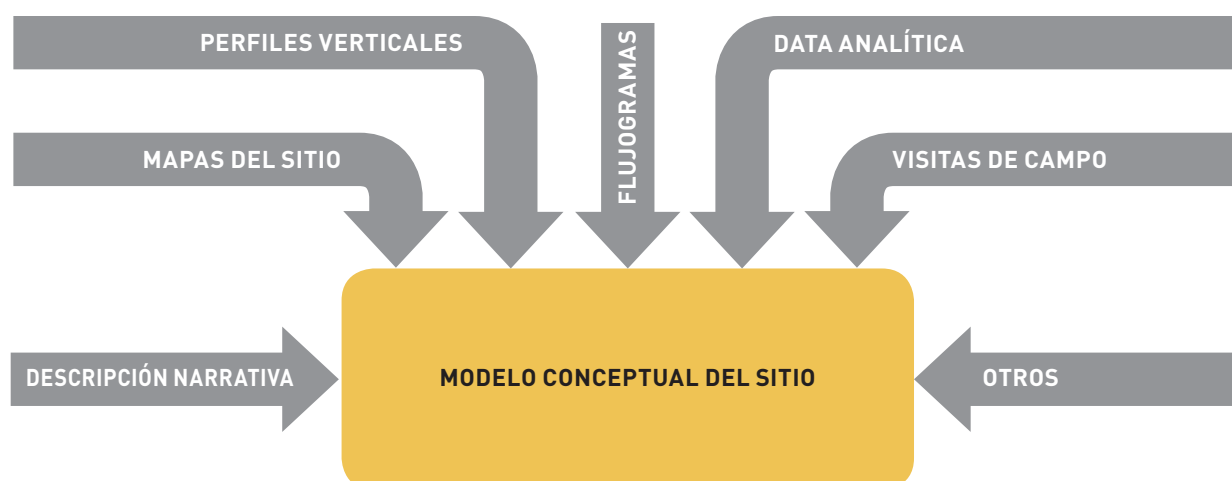
- ◆ Integrar la información técnica disponible de diferentes fuentes de información (datos existentes y obtenidos durante la evaluación del sitio).
- ◆ Apoyar la selección de los puntos de muestreo de los diferentes componentes ambientales (suelo, agua subterránea, sedimentos, etc.).
- ◆ Identificar la información faltante y determinar la necesidad de desarrollar actividades de evaluación adicionales.
- ◆ Evaluar los riesgos que genera o puede generar el sitio contaminado para la salud de las personas o para el ambiente.

- ◆ Apoyar la selección de alternativas de remediación y evaluar su efectividad para reducir la exposición de los receptores a la contaminación.
- ◆ Aprender los problemas relacionados con el sitio contaminado para utilizarlos en la comunicación con los actores involucrados.

Un MCS se beneficia del uso de diferentes formatos para representar y apreciar la información disponible del sitio (ilustración 7).

Entre estos formatos, la descripción narrativa es el mejor medio para caracterizar el sitio (ubicación, hidrogeología, usos, etc.), su historia, la naturaleza de las fuentes de contaminación, aspectos cuantitativos de las rutas de migración de los contaminantes, identificación de receptores humanos y ambientales, así como escenarios de exposición comprobados y supuestos.

Cada MCS debe incluir mapas. Estos deben mostrar por lo menos la posición relativa de

ILUSTRACIÓN 7. Modelo conceptual del sitio contaminado: contenidos requeridos

Fuente: Elaboración propia con base en US EPA, 2000.

las fuentes, los determinantes de las rutas, las limitaciones geográficas, los cuerpos de agua superficial, la dirección del viento predominante y las plumas de contaminación (mapas con curvas de concentraciones).

Si se tratase de contaminación en el subsuelo se deben incluir perfiles verticales del sitio, los cuales deben ser sustentados con registros (*logs*) de perforación que muestren la litología y la distribución de los contaminantes.

Asimismo, agregar tablas con los datos analíticos en los mapas de flujo del agua subterránea (mapas de hidroisohipsas) y de la distribución de los contaminantes (mapas con curvas de concentraciones) para sustentar la presentación y la interpretación de los datos. Estas tablas deben vincularse con elementos gráficos del mapa (por ejemplo, piezómetros) y deben contener solo datos representativos, no una presentación exhaustiva de todos los datos obtenidos.

Por otro lado, es útil ilustrar a través de flujogramas las interrelaciones entre las fuentes de contaminación, las rutas y vías de exposición y los receptores. Por ejemplo, la ilustración 8 muestra el flujograma de un MCS elaborado por la Autoridad Regional Ambiental de Are-

quipa (ARMA) para un sitio contaminado por la actividad minera artesanal.

A continuación se exponen los principales elementos y pasos para desarrollar un MCS (1.7.2) y se describen cinco tipos de contaminación (ver 1.8), los cuales deben entenderse como MCS estandarizados para situaciones que se encuentran con frecuencia en sitios contaminados.

Cabe destacar que esta guía no proporciona MCS detallados de sitios específicos debido a que, las condiciones pueden variar considerablemente entre un sitio contaminado y otro (ASTM, 2014a, ítem 1)¹³.

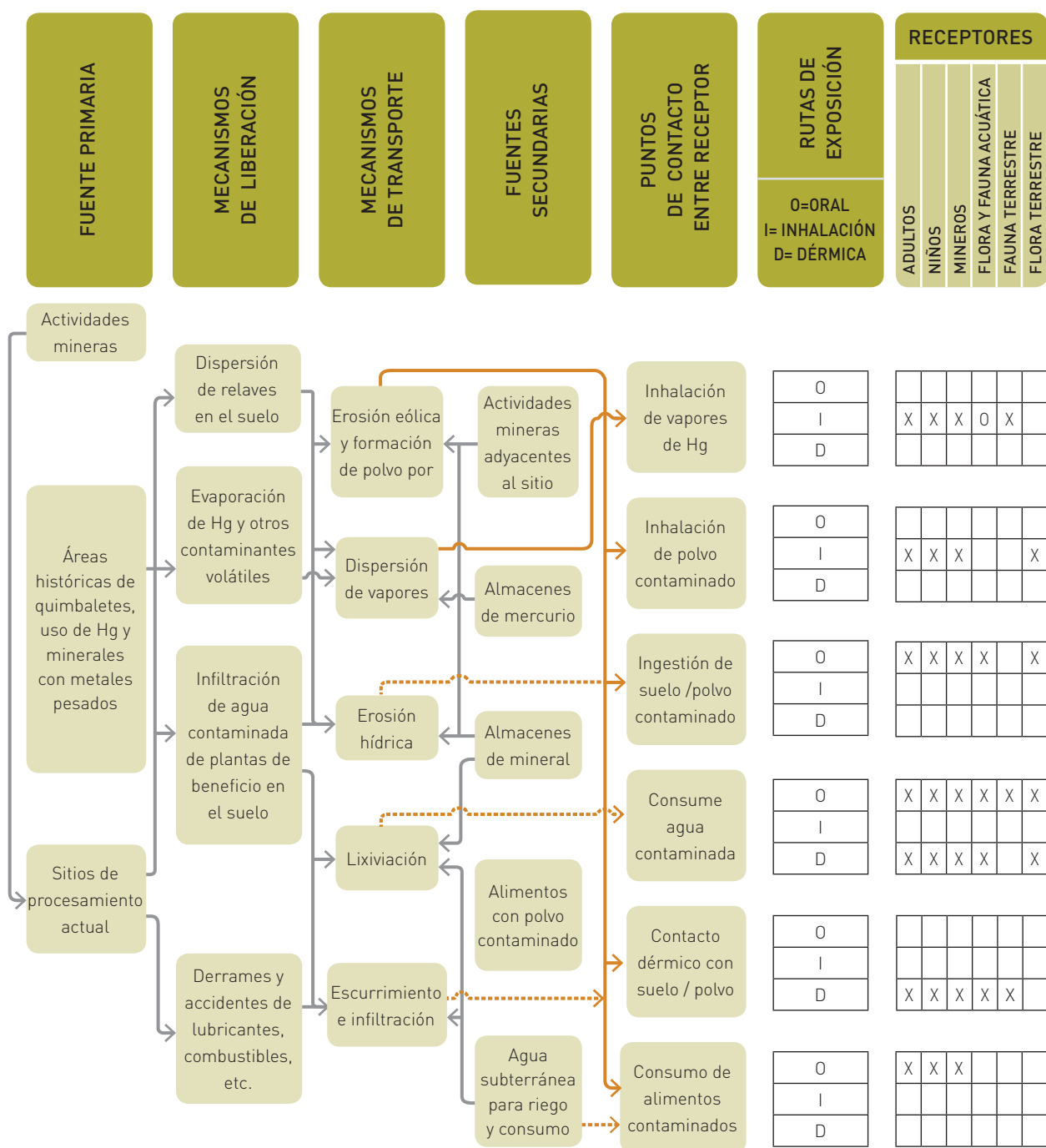
1.7.2. PROCEDIMIENTO DE ELABORACIÓN

Los principales pasos para el desarrollo de un MCS son los siguientes:

- ◆ Identificación y caracterización de las fuentes de contaminación y las condiciones naturales del sitio (geografía, clima, hidrogeología, geología, tipo de suelos, etc.).
- ◆ Determinación de los contaminantes.
- ◆ Establecimiento de NdF para cada medio afectado.

13. Más información sobre el desarrollo de modelos conceptuales en sitios contaminados puede encontrarse, por ejemplo, en la guía canadiense (CCME, 2016a), en la norma ASTM International E1689-95 (ASTM, 2014a), en la guía específica estadounidense (EPA, 1996, Apéndice A) y en los materiales de entrenamiento que proporciona el ITRC, los que pueden consultarse en su portal electrónico (<http://www.itrcweb.org/>).

ILUSTRACIÓN 8. Ejemplo de modelo conceptual del sitio: presentación como flujograma



Fuente: ARMA, 2014, Anexo B.

- ◆ Identificación de las rutas y las vías de exposición.
- ◆ Identificación y caracterización de los receptores potenciales.
- ◆ Determinación de los límites del área en estudio y de las condiciones del entorno.

Estos pasos no tienen que seguir necesariamente este orden.

El grado de complejidad está en función de las características del sitio y de los datos disponibles. En otras palabras, el MCS debe ser tan sencillo como sea posible y tan complejo como sea necesario.

Lo usual es elaborar un MCS para cada sitio contaminado, salvo que existan sitios múltiples que se ubiquen tan próximos entre ellos que no sea posible determinar la(s) fuente(s) indivi-

dual(es) de la contaminación. En este caso, se pueden agrupar los sitios y desarrollar el MCS para el conjunto de estos.

La elaboración del MCS se inicia ya en la *fase de identificación* del sitio con base en la información obtenida durante la *investigación histórica* y el *levantamiento técnico* (*inspección*).

Mientras se ejecute el proceso de evaluación en el sitio se retroalimentará el MCS con los resultados del *muestreo de identificación* (MI) y de la *fase de caracterización* (ver capítulo 3), con el fin de obtener un modelo conceptual «final» que contenga información suficiente para responder a las preguntas establecidas en los objetivos de evaluación, y apoyar la toma de decisiones en datos confiables sobre la contaminación en el sitio y sus interrelaciones con los potenciales receptores humanos y ambientales.

A continuación, se describe cada paso a seguir en el desarrollo de un MCS de un sitio contaminado.

Paso 1. Identificación y caracterización de las fuentes de contaminación

La identificación y la caracterización de las fuentes de contaminación son el inicio del desarrollo del MCS.

Se considera como fuente de contaminación cualquier componente, instalación o proceso de actividades antrópicas que pueda liberar contaminantes al ambiente.

Existe una gran variedad de fuentes de contaminación, las cuales pueden clasificarse *grasso modo* como fuentes puntuales y fuentes no puntuales (difusas). Ejemplos de fuentes puntuales son tanques subterráneos de combustible con fugas, derrames accidentales de materiales peligrosos en sitios industriales, áreas de disposición inadecuada de residuos peligrosos y botaderos. Las fuentes no puntuales incluyen, por ejemplo, el vertimiento de aguas contaminadas sobre campos agrícolas o la dispersión eólica de contaminantes provenientes de emisiones al aire.

Vale recordar que, mientras no se haya compro-

bado que una fuente libera (o haya liberado) realmente contaminantes al ambiente, se debe hablar de una «fuente potencial de contaminación».

Identificación de las fuentes de contaminación

La identificación de las fuentes de contaminación usualmente se inicia con una evaluación de las actividades antrópicas que se desarrollaron o desarrollan en el sitio bajo estudio. En este contexto, se analizan los procesos y se identifican los componentes y las instalaciones donde se usan, manejan, almacenan, transportan, producen, emiten o disponen sustancias químicas, materiales o residuos peligrosos capaces de generar contaminación del suelo.

DEFINICIONES

ACTIVIDADES POTENCIALMENTE CONTAMINANTES PARA EL SUELO

Se consideran actividades potencialmente contaminantes para el suelo aquellos proyectos o actividades antrópicas cuyo desarrollo implica el uso, manejo, almacenamiento, transporte, producción, emisión o disposición de sustancias químicas, materiales o residuos peligrosos capaces de generar la contaminación del suelo y de los componentes ambientales asociados a este, por su toxicidad, movilidad, persistencia, biodegradabilidad, entre otras características de peligrosidad establecidas en las guías técnicas aprobadas por el Ministerio del Ambiente.

Área de potencial interés. - Se trata de áreas identificadas durante la fase de identificación en las cuales existen indicios o evidencias de contaminación del suelo sobre el cual se realizarán las labores de muestreo.

Fuente de contaminación. - Este término se denomina también “fuente primaria de contaminación”, y comprende cualquier componente, instalación o proceso de actividades antrópicas, que puede liberar

contaminantes al ambiente.

Foco de contaminación.- Este término se denomina también “fuente secundaria de contaminación” o “*hotspot*”, y comprende los componentes ambientales afectados por las fuentes primarias de contaminación, que se caracterizan por presentar altas concentraciones de contaminantes y ser potenciales generadores de contaminación en otros componentes ambientales.

Fuente: Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados, aprobados por el Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM.

A partir de información documental y, eventualmente, hallazgos en campo, se determinan las posibles fuentes primarias y secundarias (focos) de contaminación, y se evalúa la probabilidad de que las fuentes identificadas generen o hayan generado una contaminación en el ambiente (ver recuadro). Esta labor se realiza por lo general en el marco de la *evaluación preliminar* (EP) de un sitio. Posteriormente, se efectúa el MI, a través del cual se comprueba o descarta mediante mediciones en campo si las fuentes potenciales identificadas en la EP generaron realmente contaminación en el ambiente.

Caracterización de las fuentes de contaminación

El alcance de la caracterización de las fuentes de contaminación depende de varios factores como el tipo de fuentes (por ejemplo, tanque de combustible derramado, relleno de residuos peligrosos o depósito de relaves), las características de los componentes ambientales afectados (suelo, agua subterránea, fase gaseosa del suelo, etc.) y en qué etapa de evaluación del sitio se desarrolla el MCS.

Habitualmente, se debe medir o estimar por lo menos las siguientes características de las fuentes en un sitio:

◆ Localización de las fuentes primarias y secundarias, indicando su:

- Ubicación
- Límites
- Volumen

La ubicación de las fuentes en los mapas debe ser precisa, incluyendo escala e indicación de orientación (norte, sur), y debe señalar la localización de las fuentes en relación con las fronteras de la propiedad.

◆ Tipo y concentración promedio de los contaminantes en las fuentes.

◆ Tiempo de inicio, duración y tasa con la cual las fuentes liberan o liberaron contaminantes al ambiente.

Paso 2. Determinación de los contaminantes

Este paso tiene la finalidad de determinar la presencia de contaminantes (ver recuadro) en los componentes ambientales suelo, agua subterránea, agua superficial, sedimentos, aire y biota. De no encontrar contaminantes en el sitio, el MCS debe servir para documentar este hallazgo.

El alcance de la determinación de los contaminantes depende de las fases de evaluación del sitio en las cuales se desarrolla el MCS.

Al inicio de la evaluación de un sitio con sospecha de contaminación se identifican los *contaminantes de potencial interés* (CPI), es decir, se determinan las sustancias químicas asociadas a las actividades que se desarrollan o se desarrollaron en el sitio y que son susceptibles de causar efectos nocivos para la salud de las personas o para el ambiente.

En esta fase se desconoce todavía si se liberaron las sustancias identificadas al ambiente y puede existir gran incertidumbre sobre los tipos de sustancias contaminantes presentes en el sitio. Por este motivo, se incluye en el desarrollo de un MCS

DEFINICIONES

CONTAMINANTE

Cualquier sustancia química relacionada con actividades antrópicas susceptible de causar efectos nocivos para la salud de las personas o para el ambiente.

CONTAMINANTE DE POTENCIAL INTERÉS

Cualquier sustancia química susceptible de causar efectos nocivos para la salud de las personas o para el ambiente asociada a las actividades antrópicas que se desarrollan o desarrollaron en el sitio bajo estudio. En ellas se enfocan el muestreo de identificación y el muestreo de detalle, tras las conclusiones de la evaluación preliminar.

Fuente: Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados, aprobados por el Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM

inicial típicamente solo la identificación de «contaminantes potenciales».

En las etapas posteriores de la evaluación del sitio (MI, caracterización) se va generando información adicional sobre los contaminantes en el sitio, la cual es incluida en el modelo conceptual.

Por tanto, la determinación de contaminantes para un MCS actualizado o final puede incluir información detallada sobre los contaminantes en el sitio, como:

- ◆ Tipo de contaminantes (sustancia química / mezclas de sustancias).
- ◆ Distribución de los contaminantes en los diferentes componentes ambientales: concentraciones en el suelo, agua subterránea, agua superficial, sedimentos, aire.
- ◆ Especiaciones químicas: por ejemplo, determinación de arsénico (As^{3+}/As^{5+}).
- ◆ Metabolitos generados por degradación / transformación de los contaminantes «originales»: por ejemplo, degradación de tetracloroetileno a cloruro de vinilo.
- ◆ Movilidad de los contaminantes en el am-

biente: por ejemplo, resultados de ensayos de lixiviación de metales en suelos.

- ◆ Biodisponibilidad: por ejemplo, determinación a través de muestras en biota o ensayos de biodisponibilidad.
- ◆ Factores del ambiente que influyen en el comportamiento y la toxicidad de los contaminantes: por ejemplo, índice de acidez (pH) o contenido de materia orgánica.

Paso 3. Establecimiento de los niveles de fondo para cada medio afectado

La determinación de los NdF (ver recuadro) tiene como finalidades principales:

- ◆ Establecer la variación de concentraciones de una sustancia en el sitio que puede ser atribuida a un origen natural.
- ◆ Establecer la variación de concentraciones de una sustancia en el sitio que puede ser atribuida a una fuente no relacionada con el sitio bajo estudio.
- ◆ Evaluar el grado en el cual la contaminación del sitio excede la concentración natural.

DEFINICIONES

NIVEL DE FONDO

Concentración de origen natural de una o más sustancias químicas presentes en los componentes ambientales, que puede incluir el aporte de fuentes antrópicas no relacionadas al sitio potencialmente contaminado o contaminado.

Fuente: Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados, aprobados por el Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM.

Normalmente, se pueden determinar los NdF en todos los componentes ambientales, como suelo, sedimentos, agua subterránea, agua superficial, aire y biota; sin embargo, dependerá de cada caso concreto en qué componentes ambientales se requiere determinar los NdF, y para qué sustancias.

La determinación de los NdF no es necesaria

cuando la información existente sobre el sitio y su entorno (geología, hidrogeología, hidrología, fuentes potenciales de contaminación, etc.) y el tipo de contaminantes de interés permiten descartar *a priori* la presencia de elevados NdF en la zona de estudio («hipótesis cero»).

Cabe agregar que, muchos contaminantes son sustancias químicas sintéticas que no aparecen de forma natural en el ambiente, como los bifenilos policlorados (PCB, por sus siglas en inglés) o los solventes organoclorados (tetracloroetileno, tricloroetileno). En estos casos, se puede asumir que el aporte natural de los contaminantes en el sitio es cero. En cambio, cuando existan fuera del sitio bajo estudio otras fuentes potenciales de contaminación con contaminantes de

interés, la determinación de los NdF puede servir para identificar el aporte de las fuentes externas a la contaminación del sitio.

Los hidrocarburos de petróleo, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP, por sus siglas en inglés), los compuestos orgánicos volátiles (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) son sustancias que existen también de forma natural pero su presencia en el ambiente (suelo, agua, aire) es usualmente de origen antrópico, puesto que los afloramientos naturales de petróleo son fenómenos naturales muy poco comunes.

En cambio, los metales pesados y los metaloides (arsénico, bario, cadmio, cromo, mercurio, plomo, etc.) pueden encontrarse de forma natural en el ambiente, sobre todo en zonas mine-

ILUSTRACIÓN 9. Rutas y vías de exposición: ejemplo escenario de exposición actual y futura en ruta aguas subterráneas



RUTAS Y VÍAS DE EXPOSICIÓN: CASO DE TANQUE SUBTERRÁNEO

Un tanque subterráneo con fuga (= fuente primaria) generó una contaminación con combustibles en el suelo (= fuente secundaria). Como consecuencia se formó en el agua subterránea (= medio de transporte) una pluma de contaminación con HAP de aproximadamente 150 metros de longitud. Más o menos 300 metros aguas abajo del tanque derramado se encuentra un pozo que utiliza la población local (= receptores) para su abastecimiento con agua potable (= punto de exposición).

Actualmente, el agua del pozo no está contaminada y, por tanto, la ruta de exposición se considera incompleta. Sin embargo, la determinación de las rutas y las vías de exposición debe contener una evaluación sobre el potencial o la probabilidad de que la pluma de contaminación llegue en el futuro al pozo. En ese caso, la ruta se convertiría en completa porque se cerraría la vinculación entre la contaminación y los receptores (en este caso por el consumo de agua del pozo contaminado).

Elaboración propia.

realizadas o en aquellas que han experimentado la descomposición de minerales que contengan estos elementos. En esos casos, la determinación de los NdF es básica para distinguir entre alteraciones naturales y la contaminación proveniente de la actividad humana en el sitio.

Mayor información sobre la determinación de los NdF y su respectivo muestreo se presenta más adelante en esta guía y en la guía para el muestreo de suelos¹⁴ (ver 1.3.3 y 5.2.3).

Paso 4. Identificación de las rutas y las vías de exposición

Para cada fuente de contaminación se deben identificar las potenciales rutas y vías de exposición, las cuales describen los mecanismos de liberación, transporte y migración de los contaminantes desde la(s) fuente(s), a través de los diferentes componentes ambientales afectados (suelo, agua subterránea, agua superficial, biota, sedimentos y aire), hasta los puntos en los que los potenciales receptores entran en contacto con estos.

En ese contexto se debe distinguir entre rutas completas e incompletas. Una ruta de exposición se considera incompleta cuando falta por lo menos uno de los siguientes elementos:

- ◆ Un mecanismo o proceso que libera contaminantes al ambiente desde las fuentes primarias o secundarias.
- ◆ Un medio (componente ambiental) de transporte, si los potenciales receptores no se encuentran en el mismo lugar que la fuente.
- ◆ Un punto de exposición potencial en el cual entran en contacto los receptores y el medio contaminado.

La identificación de las rutas y las vías de exposición no debe limitarse a la situación actual del sitio, sino que debe considerar también el potencial o la probabilidad futura de que los contaminantes lleguen a los receptores.

A continuación se presenta un ejemplo de escenario de exposición a compuestos orgánicos volátiles (COV), como la suma de benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX), actual y futuro (ilustración 9).

Las rutas de exposición pueden categorizarse de acuerdo con el medio que transporta los contaminantes. Usualmente, se distingue entre las siguientes rutas:

- ◆ Ruta agua subterránea
- ◆ Ruta agua superficial y sedimentos
- ◆ Ruta aire
- ◆ Ruta suelo (contacto directo)
- ◆ Ruta biota

A continuación se proporcionan indicaciones generales sobre cada una de estas rutas y cuando se consideran en el desarrollo del MCS.

Ruta agua subterránea

Esta ruta debe considerarse cuando sólidos o líquidos peligrosos entran en contacto con el suelo superficial, el subsuelo o la roca. Se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- ◆ Características físico-químicas de los contaminantes que determinan su migración y transporte hasta el agua subterránea.
- ◆ Geología e hidrogeología del sitio (litología, permeabilidad de los estratos, etc.).
- ◆ Tasas de infiltración.
- ◆ Distancia vertical a la napa freática.
- ◆ Tasas de flujo del agua en el subsuelo.
- ◆ Presencia o proximidad de filtraciones, manantiales o cavernas aguas abajo.
- ◆ Condiciones de las aguas subterráneas confinadas o artesianas.
- ◆ Existencia de pozos, en particular para irrigación o consumo como agua potable.
- ◆ Otros fenómenos que influyen en la migración y el transporte de los contaminantes

14. Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM

en el agua subterránea, como dispersión hidrodinámica, efectos de transformación, retardación y degradación de los contaminantes.

- ◆ Efectos del movimiento de los contaminantes en la zona vadosa (no saturada) del suelo.

Ruta agua superficial y sedimentos

Esta ruta siempre debe ser considerada en las siguientes situaciones alternativas:

- ◆ Cuando un cuerpo de agua superficial no estacional (río, riachuelo, arroyo, lago, laguna, etc.) se encuentra en contacto directo o puede ser afectado por una fuente de contaminación o un área contaminada.
- ◆ Cuando existe una ruta completa desde una fuente de contaminación, o un área contaminada, hasta el cuerpo de agua superficial.
- ◆ Cuando los resultados del muestreo y del análisis de cuerpos de aguas superficiales o sedimentos evidencian concentraciones que superan los NdF.
- ◆ Cuando se conocen o sospechan descargas de aguas subterráneas contaminadas, o escorrentías de aguas superficiales contaminadas, hacia un cuerpo de agua superficial.
- ◆ Cuando bajo condiciones áridas es posible que drenajes efímeros puedan trasladar contaminantes a puntos de exposición ubicados aguas abajo.

Ruta aire

El componente ambiental «aire» incluye tanto el aire atmosférico, como el aire del subsuelo (fase gaseosa del suelo) y el aire en ambientes cerrados (casas, sótanos, alcantarillado, etc.). El transporte de contaminantes a través del aire debe ser evaluado para contaminantes en el suelo superficial, el subsuelo, agua superficial, agua subterránea, u otro medio, cuando existe la posibilidad de que, a partir de ellos, se liberen gases o material particulado (polvos) al aire.

La evaluación de esta ruta debe considerar también una posible migración de contaminantes a través de un transporte eólico hacia otros componentes ambientales.

Una evaluación de la ruta aire es, por ejemplo, indicado en los siguientes casos:

- ◆ Contaminación del subsuelo y/o del agua subterránea con contaminantes volátiles (BTEX, solventes organoclorados, etc.), sobre todo cuando existe el potencial que los contaminantes migren a través de la fase gaseosa del suelo hacia la superficie, y/o se acumulen gases tóxicos y/o explosivos en ambientes cerrados (casas, alcantarillado, etc.).
- ◆ Botaderos o áreas degradadas por la acumulación inadecuada de residuos sólidos con generación de gases (metano, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, etc.).
- ◆ Disposición de partículas contaminadas en suelos o aguas superficiales (por ejemplo polvos contaminados con metales e hidrocarburos poliaromáticos, emitidas al aire por la incineración de residuos).

Ruta suelo (contacto directo)

Esta ruta es de importancia cuando existe la posibilidad que los receptores humanos o ecológicos entren en contacto directo con los suelos contaminados. Este contacto puede incluir la ingestión, inhalación o el contacto dérmico con suelos contaminados.

La exposición directa a suelos contaminados depende de la profundidad de la contaminación. Por lo general, los seres humanos están expuestos a suelos superficiales (excepción: por ejemplo cuando se realizan excavaciones en obras civiles), mientras que plantas y animales pueden entrar en contacto con suelos más profundos.

Por tal motivo, es importante que se consideren en la evaluación de suelos contaminados las profundidades relevantes para los escenarios de exposición que pueden darse en el sitio (ver también tabla en el capítulo 3.8.2).

En el caso de la ruta biota, deben considerarse efectos de bioacumulación y bioconcentración en los organismos y el potencial de transferencia y biomagnificación de los contaminantes a lo largo de las cadenas tróficas. Asimismo, se debe tener en cuenta el transporte de contaminantes a través del movimiento de animales. Por ejemplo, muchos contaminantes lipofílicos que se encuentran en suelos o sedimentos pueden bioacumularse y bioconcentrarse en organismos tales como plancton, gusanos o herbívoros, y biomagnificarse en organismos tales como peces, mamíferos o aves carnívoros. El movimiento de biota contaminada puede transportar contaminantes a otros lados, por ejemplo peces contaminados con mercurio pueden transportar el mercurio a lo largo de los ríos donde ellos circulan.

Ruta biota

La ruta biota es relevante siempre que, en el contexto de las investigaciones de un sitio, los componentes animales o vegetales resultan potencialmente importantes para el transporte de contaminantes o como receptores ecológicos que puedan verse afectados por la contaminación.

En la evaluación de riesgos para la salud humana, el muestreo biológico es pertinente en las zonas donde la vía de exposición por ingestión de pescado es significativa. Este muestreo también resulta crucial al caracterizar los riesgos asociados al consumo de verduras, carne de animales domésticos, productos lácteos o caza local.

En la caracterización del riesgo ecológico, las exposiciones alimentarias a contaminantes bioacumulativos suelen predominar en la fauna silvestre, justificando una consideración especial en las evaluaciones de riesgo para aves y mamíferos carnívoros. Los datos químicos de los tejidos de los peces pueden emplearse tanto para evaluar los riesgos para los propios peces como para los seres humanos y la fauna que los consume.

El muestreo biológico se realiza generalmente

por las siguientes razones:

1. Para medir directamente la biodisponibilidad;
2. Para proporcionar estimaciones específicas del lugar de exposición a los organismos y sus depredadores;
3. Relacionar los niveles residuales en los tejidos con las concentraciones en los medios ambientales (por ejemplo, en el suelo, los sedimentos o el agua) o con las directrices sobre residuos en los tejidos; y
4. Controlar la productividad o la estructura de la comunidad.

El muestreo biológico suele ser fundamental para la caracterización del riesgo en zonas de estudio con COPC bioacumulativos (por ejemplo, diclorodifeniltricloroetano [DDT], dieldrina y muchos otros plaguicidas, así como bifenilos policlorados [PCB], dioxinas y furanos [PCDD/F], plomo y metilmercurio). El siguiente listado presenta fuentes de información para seleccionar compuestos bioacumulativos. Aunque muchas de estas referencias se centran en compuestos bioacumulativos en tejidos de peces, los compuestos identificados también pueden ser preocupantes en organismos terrestres y otros organismos acuáticos. En la bibliografía disponible no se identificaron fuentes comparables que identificaran compuestos bioacumulativos específicos de otros organismos (por ejemplo, mariscos, fauna silvestre, invertebrados terrestres), lo que probablemente refleja el hecho de que esos organismos se muestrean con menos frecuencia que los peces (CCME, 2016^a).

El Gobierno de Canadá elaboró un inventario, denominado Lista de Sustancias Domésticas (DSL, por sus siglas en inglés), de aproximadamente 23 000 sustancias. Las sustancias de la DSL clasificadas como bioacumulativas pueden encontrarse en <http://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/default.asp?lang=En&n=5F213FA8-1&wsdoc=D031CB30-B31B-D54C-0E46-37E32D526A1F>

◆ 1997 *Listing of Fish and Wildlife Consumption Advisories* (USEPA, 1997)

- ◆ Regional Ambient Fish Tissue Monitoring Program (RAFT) contaminants of concern (provided by USEPA Region 7)
- ◆ USEPA. 2000. *Guidance for Assessing Chemical Contaminant Data for Use in Fish Advisories Volume 1, Fish Sampling and Analysis*, Third Edition, EPA 823-B-00-007
- ◆ *Persistent Organic Pollutants (POPs) listed in "Substantiation report of the Task Force on POP," 4th meeting, Den Haag (the Netherlands), February 21-25, 1994*
- ◆ USEPA and USACE (1998) *Inland Testing Manual, Evaluation of Dredged Material Proposed For Discharge in Waters of the U.S. - Testing Manual, February*, EPA-823- B- 98-004 (see Tables 9-5 and 9-6 in that document)
- ◆ *Recommended target analytes in USEPA (1995) Guidance for Assessing Chemical Contaminant Data for Use in Fish Advisories. Volume 1. Fish sampling and analysis. Second edition*, EPA 823-R-95-007

Paso 5. Identificar y caracterizar los receptores potenciales

Este paso tiene la finalidad de identificar y caracterizar los receptores humanos y ecológicos que están actualmente o potencialmente expuestos a la contaminación del sitio. Los receptores incluyen los humanos u otros organismos que están en contacto directo con la fuente de contaminación, potencialmente presentes a lo largo de las rutas de migración de los contaminantes, o que se encuentren en proximidad al sitio contaminado.

La identificación y la caracterización de los receptores pueden realizarse con diferente grado de detalle; con este fin es indispensable determinar en cada caso concreto la información que se requiere para lograr los objetivos de evaluación del sitio. Por ejemplo, la identificación de todas las especies ecológicas presentes en el sitio puede ser una tarea muy difícil o incluso imposible; en muchos casos, suele ser suficiente identificar las especies representati-

vas o los mayores grupos de especies.

En el caso de los receptores humanos puede resultar suficiente identificar los grupos de población más expuestos. En otros casos, por ejemplo cuando se prevé la realización de una ERSa, puede requerirse recoger información detallada sobre las personas (potencialmente) expuestas, su grado de vulnerabilidad y sus patrones de comportamiento, entre otros aspectos. Mayor detalle en este aspecto se encuentra en la *Guía para la elaboración de estudios de ERSa en sitios contaminados*¹⁵ (MINAM, 2015).

Receptores humanos

Los receptores humanos incluyen diferentes grupos poblacionales e individuos que están, o pueden estar, expuestos a la contaminación del sitio. Estos receptores se caracterizan por diferentes grados de vulnerabilidad, patrones de comportamiento o hábitos, los que influyen sobre su exposición y los posibles efectos nocivos que esta produzca. Ejemplos de grupos de receptores humanos son:

- ◆ Trabajadores
- ◆ Residentes
- ◆ Niños
- ◆ Poblaciones nativas

El MCS se incluye una lista de los receptores humanos identificados. Asimismo, contiene mapas que señalen la ubicación de los centros poblados potencialmente expuestos al sitio contaminado y su entorno.

Los mapas de ubicación indican los usos sensibles en el área de estudio, como jardines infantiles, escuelas, parques, campos de fútbol, huertos, etc. También incluyen mapas de los pozos subterráneos ubicados en el sitio y su entorno que se utilicen para el abastecimiento de agua potable y para irrigación.

Receptores ecológicos

Los receptores ecológicos incluyen especies de

15. Resolución Ministerial N° 034-2015-MINAM

flora, fauna y ecosistemas que estén expuestos, o pueden estarlo, a la contaminación del sitio.

El MCS contienen mapas que señalen los hábitats terrestres y acuáticos dentro y en el entorno del sitio bajo estudio. Asimismo, deben mostrarse las áreas que se encuentran bajo alguna protección ecológica especial, como parques nacionales, santuarios nacionales, reservas nacionales, zonas de amortiguamiento, bosques de protección, ecosistemas frágiles, etc.

Paso 6. Determinación de los límites del área en estudio y de las condiciones del entorno

El MCS debe incluir un mapa que indique las fronteras físicas en las cuales los receptores están actual o potencialmente expuestos a las fuentes y las rutas de migración de los contaminantes.

Las fronteras físicas que determinan el área de estudio pueden constituir límites geográficos (cuencas hidrográficas, límites topográficos), límites de carácter legal (predio/propiedad, concesión, área de influencia directa/indirecta, etc.) o pueden determinarse en función de la extensión de la contaminación en los diferentes componentes ambientales.

1.8 Principales tipos de contaminación y estrategias de muestreo

Existen distintos tipos de contaminación, los que se pueden agrupar en cinco casos principales. A cada uno de ellos corresponde una estrategia de muestreo diferente.

1.8.1. TIPOLOGÍA DE CASOS

Los más frecuentes son cinco tipos de sitios contaminados a los cuales corresponden distintos lineamientos para el desarrollo del MI y de la caracterización en cada uno de estos escenarios.

Mayor información sobre el desarrollo del muestreo en suelos y de la fase gaseosa del suelo contienen la guía para el muestreo de suelos¹⁶ (MINAM, 2014) y los manuales de buenas prácticas para muestreo de suelos y aguas subterráneas en la investigación de sitios contaminados (MINAM, 2016a; MINAM, 2016b).

La estrategia del muestreo en un sitio está en función de varios factores, como los objetivos de la evaluación, la ubicación y la naturaleza de las fuentes potenciales y comprobadas de contaminación, de los componentes ambientales (potencialmente) afectados y de los receptores que están, o pueden estar, expuestos a la contaminación.

No puede existir un patrón único para el desarrollo del muestreo en un sitio contaminado; sin embargo, hay en muchos sitios escenarios de contaminación parecidos que requieren de estrategias de muestreo similares.

La tipología que se presenta a continuación considera cinco tipos o modelos conceptuales simplificados y estandarizados, y su aplicación en un sitio real requiere en la mayoría de los casos una adaptación a la situación específica en el sitio. Cada uno de ellos corresponde a riesgos potenciales para la salud de las personas, pero no a escenarios en los que se afecte en primer lugar a receptores ecológicos (fauna y flora).

1.8.2. TIPO 1. CONTAMINACIÓN DEL SUELO SUPERFICIAL

Este tipo corresponde a una contaminación del suelo superficial (ver recuadro), es decir, una situación en la que la presencia de contaminantes se limita principalmente al primer metro de profundidad debajo de la superficie. Además, se caracteriza por suelos expuestos al aire, lo que permite que las personas puedan entrar en contacto directo con el suelo contaminado. Asimismo, existe la posibilidad de que el viento transporte las partículas de suelo contaminado¹⁷.

16. Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM

17. Se denomina material particulado (PM, por su sigla en inglés). En función de su grosor puede ser: *respirable* si es menor a PM₁₀, es decir, que 10 µm o micrómetros; o *fino* cuando tiene menos de PM_{2,5}, es decir, menos de 2,5 µm o micrómetros.

La ilustración 10 ofrece una presentación simplificada de este tipo de contaminación, de las principales rutas y vías de exposición con enfoque en los receptores humanos, y ejemplos para el muestreo de los diferentes componentes ambientales en las fases de identificación y de caracterización del sitio.

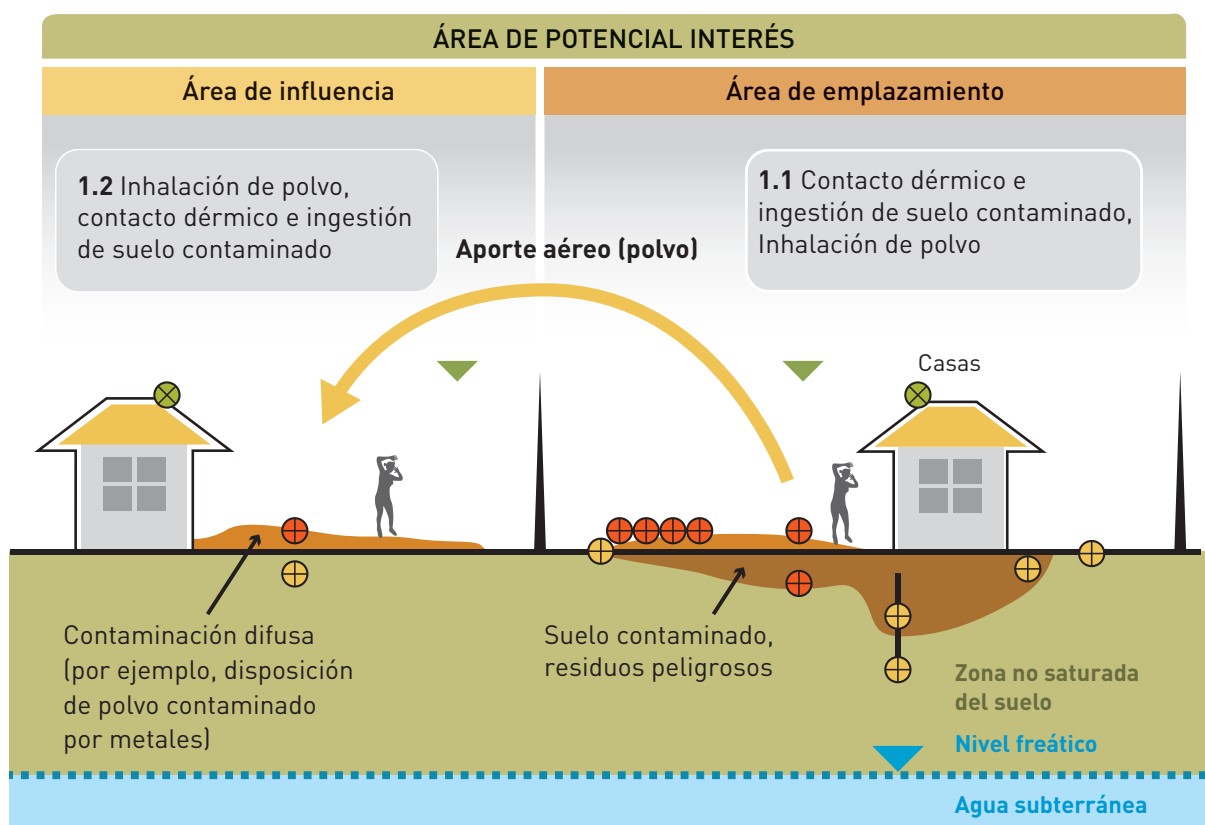
DEFINICIONES

SUELO

Material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprende desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad.

Fuente: Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados, aprobados por el Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM

ILUSTRACIÓN 10. Tipo 1: contaminación de suelo superficial



Muestreo	Suelo	Aguas subterráneas	Aire
Fase de Identificación	Muestra superficial compuesta Muestra superficial simple	No aplica	Muestreo de polvo sedimentable (por ejemplo, en techos, superficies)
Fase de caracterización	Muestra superficial Muestra subsuperficial (sondeos / perforaciones)	No aplica	Muestreo de material particulado (PM ₁₀ PM _{2.5}) Polvo sedimentable

Fuente: elaboración propia con base en Marker, 2015.

Ocurrencia

Este tipo de contaminación puede ocurrir en los siguientes casos:

- ◆ Sector minero-metálico
 - Disposición de polvos contaminados en el entorno de labores de explotación (tajos abiertos, bocaminas, etc.), de beneficio (chancadoras, molindas, etc.) y de almacenamiento de minerales polimetálicos.
 - Disposición no controlada de desechos mineros (relaves, desmontes, etc.) que contienen contaminantes (por ejemplo, metales pesados) en la superficie del suelo.
 - Vertimiento de aguas contaminadas (por ejemplo, con metales) sobre suelos superficiales.
- ◆ Sector de hidrocarburos y energético
 - Derrame de crudo de petróleo sobre suelos superficiales (accidentes de camiones, fugas en tuberías o tanques aéreos, pozos petroleros mal abandonados).
 - Disposición no controlada de residuos peligrosos o de residuos que contienen contaminantes provenientes de procesos petroleros o energéticos en la superficie del suelo.
 - Uso de suelos contaminados para la construcción de pistas, terraplenes u otras obras de modelamiento del terreno.
 - Fugas en transformadores que contienen aceites con PCB.
- ◆ Sector industrial
 - Disposición de polvos contaminados provenientes de emisiones al aire de procesos industriales (incineración, fundición, etc.).
 - Disposición no controlada de residuos peligrosos o de residuos que contienen contaminantes provenientes de procesos industriales en la superficie del suelo.

- Vertimiento de aguas industriales contaminadas sobre suelos superficiales.
- Derrame de líquidos peligrosos o contaminados sobre suelos superficiales (accidentes de camiones, fugas en tuberías o tanques superficiales, mal manejo de materiales o residuos peligrosos o contaminados).

Rutas y vías de exposición de interés

Las principales rutas de migración para este tipo de contaminación son:

- ◆ Transporte eólico de polvo contaminado proveniente de suelos resuspendidos, dentro y fuera del sitio.
- ◆ Transporte de suelos contaminados, dentro del sitio y hacia afuera, por el movimiento de vehículos (autos, camiones, etc.) o personas (zapatos y ropa ensuciada por suelos contaminados).

Las principales vías de exposición para las personas son:

- ◆ Contacto directo con suelos contaminados o con residuos peligrosos o contaminados dispuestos en la superficie (vías dermal y oral), dentro y eventualmente fuera del sitio.
- ◆ Inhalación de polvo contaminado, dentro y fuera del sitio.

Tipos relevantes de uso del suelo

Este tipo de contaminación es relevante para cualquier tipo de uso del suelo (industrial, agrícola, residencial), siempre y cuando los suelos o los residuos peligrosos o contaminados estén expuestos al aire, es decir, cuando no estén impermeabilizados con una losa de concreto, pavimento, capa superficial de suelo limpio, etc.

Estrategia de muestreo

La estrategia para el muestreo en un sitio de este tipo de contaminación puede incluir los aspectos que se indican enseguida.

TABLA 5. Muestreo para evaluar la ruta suelo (contacto directo): profundidad recomendada en función del uso del suelo

Uso del suelo	Profundidad del muestreo del suelo (desde ... hasta bajo superficie)
Agrícola	0-30 cm* 30-60 cm**
Residencial / parques	0-10 cm*** 10-30 cm****
Comercial / industrial / extractivo	0-10 cm***

* Profundidad de aradura.

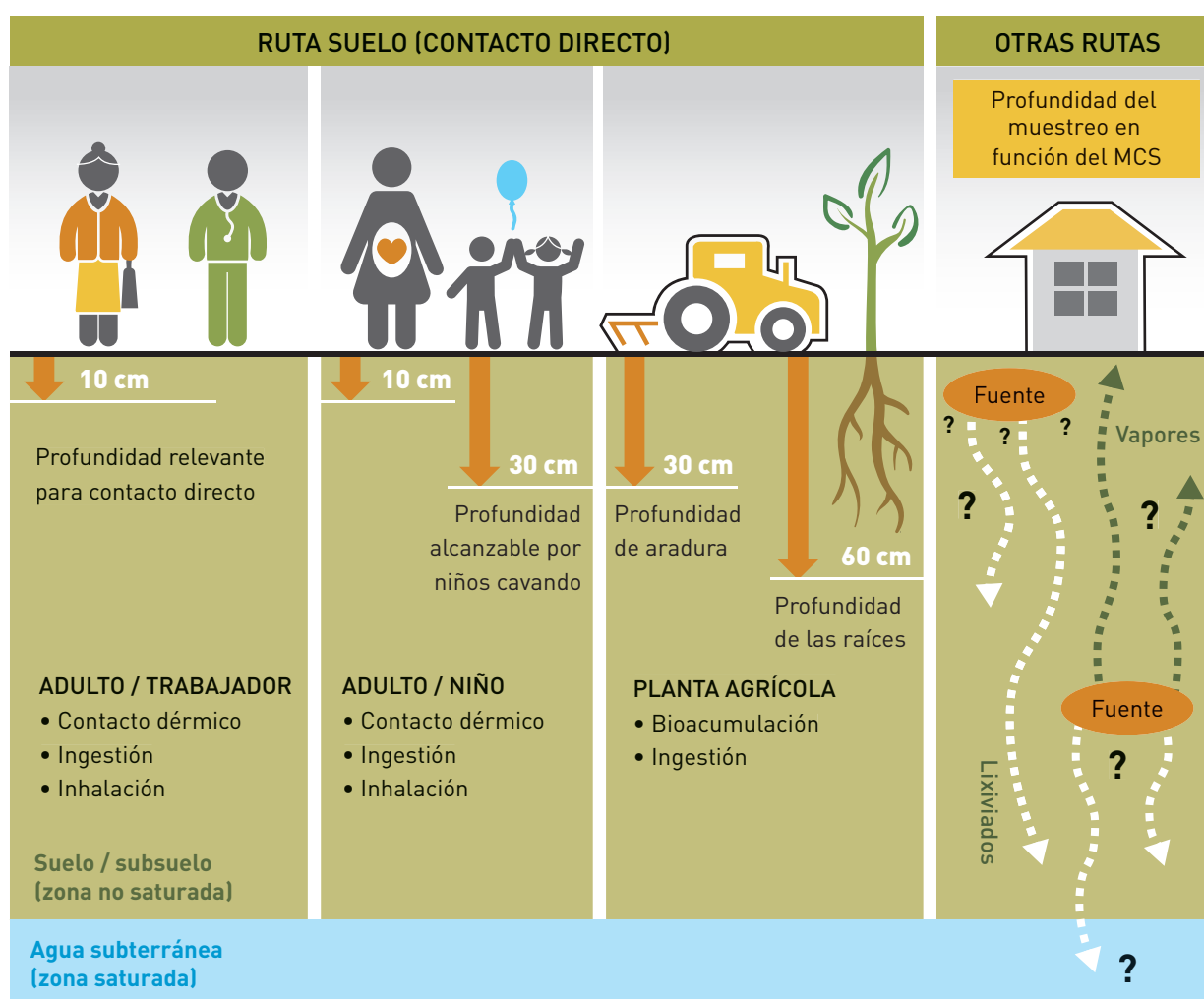
** Profundidad hasta la que llegan usualmente las raíces de las plantas agrícolas.

*** Capa de contacto oral o dermal con el suelo; tomar además muestras de 0 a 2 centímetros cuando es relevante la exposición por inhalación de suelos resuspendidos.

**** Profundidad máxima alcanzable para niños.

Fuente: elaboración propia con base en MINAM, 2014.

ILUSTRACIÓN 11. Contaminación de suelo superficial: profundidades del muestreo de suelos superficiales para la ruta suelo (contacto directo) y otras, en función del uso del suelo



Fuente: elaboración propia.

Fase de identificación

◆ Suelo

En este caso se deben ejecutar medidas como:

- Comprobar o descartar la presencia de suelos contaminados a través de la toma de muestras superficiales (compuestas o simples), según las indicaciones de la Guía para el muestreo de suelos¹⁸ (MINAM, 2014).
- Considerar en la toma de muestras superficiales las profundidades relevantes para un posible contacto directo de las personas con el suelo contaminado. Diferentes usos de suelo requieren muestras de distinta profundidad para evaluar la exposición humana por contacto directo. Esas profundidades no se aplican para la evaluación de otras rutas de exposición (por ejemplo, rutas aire o agua subterránea). Tampoco se aplican por defecto en casos en los cuales los receptores no son humanos sino ecológicos (fauna y/o flora), o para usos de suelos distintos a los señalados. En estos casos, se determinan las profundidades del muestreo en función de los escenarios de exposición relevantes en el sitio (tabla 5).

En la ilustración 11 se muestran de forma gráfica las profundidades para el muestreo de suelos con el fin de evaluar la ruta suelo (contacto directo).

- ◆ Aguas subterráneas
- ◆ No corresponde para este tipo de contaminación.
- ◆ Aire/fase gaseosa del suelo
- ◆ En este caso se debe realizar la toma de muestras de polvos sedimentables dentro del sitio (por ejemplo, techos, superficies de edificios, pisos pavimentados de campos de fútbol) y análisis por los contaminantes de potencial interés.

Fase de caracterización

◆ Suelo

En este caso es necesario delimitar la extensión horizontal y vertical de la contaminación del suelo mediante muestras superficiales y subsuperficiales (zanjas, calicatas, sondeos, etc.), siguiendo las indicaciones de la Guía para el muestreo de suelos (MINAM, 2014).

◆ Aguas subterráneas

No corresponde para este tipo de contaminación.

◆ Aire/fase gaseosa del suelo

En este caso se requiere realizar:

- Toma de muestras de polvos sedimentables fuera del sitio (considerar la dirección predominante del viento).
- Muestreo de material particulado (PM₁₀/PM_{2.5}) dentro y fuera del sitio. Analizar las muestras por los contaminantes de potencial interés y calcular la concentración de los contaminantes en el aire.

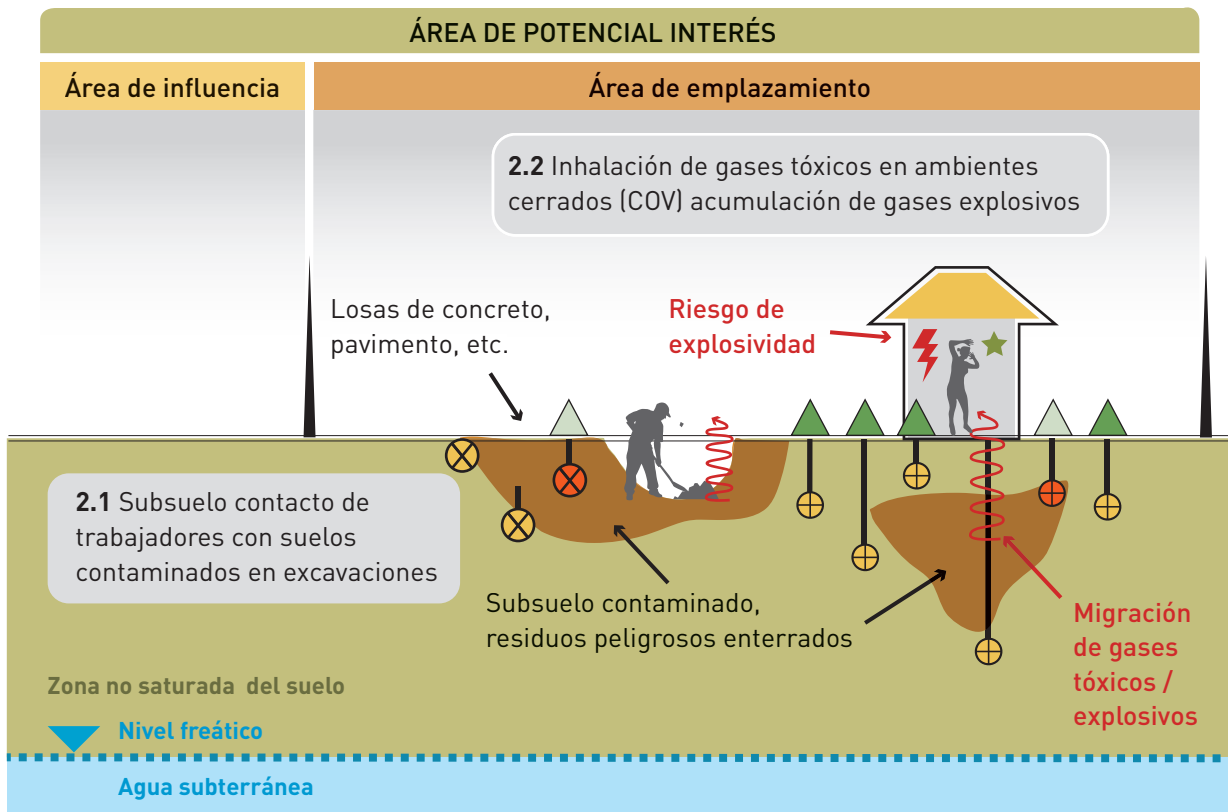
1.8.3. TIPO 2. CONTAMINACIÓN DEL SUBSUELO (ZONA NO SATURADA)

Este tipo corresponde a una contaminación de la zona no saturada del subsuelo, es decir, una situación en la que la contaminación del suelo alcanza estratos mayores a un metro de profundidad, pero que no afecta a las aguas subterráneas (zona saturada). En este caso los suelos contaminados no están necesariamente expuestos a la superficie, sino que pueden estar impermeabilizados por barreras físicas (pavimento, losas de concreto, edificaciones, etc.) o cubiertos con suelos o sustratos técnicos que evitan que las personas entren en contacto directo con ellos. También comprende residuos enterrados que se consideran peligrosos o que contienen contaminantes. En cambio, no incluye el caso en el cual la contaminación del subsuelo afectase también el agua subterránea (que corresponde al tipo 3).

La ilustración 12 muestra una representación simplificada de este tipo de contaminación, las principales rutas y vías de exposición con un

18. Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM

ILUSTRACIÓN 12. Tipo 2: contaminación del subsuelo



Muestreo	Suelo	Aguas subterráneas	Aire
Fase de Identificación	Muestras a profundidad (zanjas, sondeos, perforaciones, etc.)	No aplica	Fase gaseosa del suelo (muestreo en sondeos, PID, etc.)
Fase de caracterización	Muestras a profundidad (zanjas, sondeos, perforaciones, etc.)	No aplica	Fase gaseosa del suelo (muestreo en sondeos, PID, etc.) Mediciones de aire (muestreo, PID) en ambientes cerrados (casas, etc.)

Fuente: elaboración propia basada en Marker, 2015.

enfoque en receptores humanos, los diferentes componentes ambientales y el área de emplazamiento¹⁹ a considerarse en las fases de identificación y de caracterización del sitio.

Ocurrencia

Este tipo de contaminación puede presentarse en los siguientes casos:

- ◆ Sector minero-metálico

- Disposición de desechos mineros (relaves, desmontes, etc.) que contienen contaminantes (por ejemplo, metales pesados) en rellenos no controlados.
- Vertimiento de aguas contaminadas (por ejemplo, con metales) que se infiltran al subsuelo.
- ◆ Sector de hidrocarburos y energético
 - Derrames de crudo de petróleo, combustible, diésel, etc., generados por ac-

19. En esta pueden existir COV o gases explosivos, perceptibles a través de diversos medios como el detector de fotoionización (PID, por su sigla en inglés).

cidentes de camiones, fugas en tuberías, tanques aéreos o subterráneos, pozos petroleros mal abandonados, etc., que se infiltran al subsuelo.

- Fosas de desechos petroleros (por ejemplo, aguas de formación, lodos de perforación con petróleo y metales) no controlados en la explotación petrolera.
 - Disposición de residuos peligrosos o de residuos que contienen contaminantes provenientes de procesos petroleros o energéticos en rellenos no controlados.
- ◆ Sector industrial
- Disposición de residuos peligrosos o de residuos que contienen contaminantes provenientes de procesos industriales en rellenos no controlados.
 - Vertimiento de aguas industriales contaminadas sobre el suelo con capacidad de infiltrarse al subsuelo (por ejemplo, aguas contaminadas con solventes aromáticos u organoclorados).
 - Derrames de líquidos peligrosos o contaminados que se infiltran al subsuelo generados por accidentes de camiones, fugas en tuberías, tanques superficiales o subterráneos, mal manejo de materiales y residuos peligrosos/contaminados, etc.
- ◆ Residuos sólidos domésticos
- Disposición no controlada de residuos domésticos en botaderos. En estos casos se debe considerar que los botaderos pueden contener también residuos de otras fuentes (por ejemplo, industriales) que pueden constituir residuos peligrosos o contaminados.

Rutas y vías de exposición de interés

La principal ruta de migración para este tipo de contaminación es el transporte de gases tóxicos (por ejemplo, COV) y/o explosivos (por ejemplo, metano) a la superficie en la que se pueden acumular en ambientes cerrados (casas, sótanos, alcantarillas, etc.).

Las principales vías de exposición para las personas son:

- ◆ Contacto directo (oral o dermal) de trabajadores con suelos contaminados en el caso de excavaciones profundas.
- ◆ Inhalación de gases tóxicos, sobre todo por acumulación de contaminantes volátiles, por ejemplo, BTEX, percloroetileno (PCE) o tricloroetileno (TCE) en ambientes cerrados.
- ◆ Riesgo de explosión: acumulación de sustancias inflamables y formación de mezclas de gases explosivos en ambientes cerrados; por ejemplo, gases de combustibles o metano generado por residuos domésticos enterrados.
- ◆ Riesgo de asfixia: menor presencia del oxígeno en ambientes cerrados por la acumulación de gases como dióxido de carbono o metano; por ejemplo, generados por procesos de degradación de materia orgánica en botaderos de residuos domésticos.

Tipos relevantes de uso del suelo

Este tipo de contaminación es relevante para:

- ◆ Suelos de uso industrial o residencial con presencia de edificaciones o de instalaciones subterráneas (alcantarillas, sótanos, pozos, etc.) en los que se pueden acumular gases tóxicos y/o explosivos.
- ◆ Suelos en los cuales se realicen obras civiles con movimiento de tierras en el subsuelo, como excavaciones profundas (zanjas) para edificaciones, construcción de desagües, alcantarillas, tuberías de agua, etc.

Estrategia de muestreo

La estrategia de muestreo en un sitio con este tipo de contaminación puede incluir los aspectos que se señalan a continuación.

Fase de identificación

- ◆ Suelo

En este caso resulta necesario comprobar o descartar la presencia de suelos contaminados o de residuos peligrosos enterrados a través de la toma de muestras a profundidad (sondeos, perforaciones, zanjas, calicatas, etc.) siguiendo las indicaciones de la guía para el muestreo de suelos²⁰ (MINAM, 2014). Mayor información sobre el desarrollo de perforaciones en sitios contaminados y la toma de muestras a profundidad se puede encontrar, además, en el Manual de buenas prácticas en la investigación de sitios contaminados: muestreo de aguas subterráneas (MINAM, 2016b).

◆ Aguas subterráneas

No corresponde para este tipo de contaminación.

◆ Aire/fase gaseosa del suelo

En el caso de potenciales sitios contaminados con COV y/o gases (metano, etc.) son necesarias:

- Mediciones preliminares de COV y/o gases en la fase gaseosa del suelo (*Soil Gas Survey*) en las áreas de la presunta fuente de contaminación, por ejemplo de acuerdo con la norma ASTM D7648-12 (ASTM, 2012b).
- Muestreo de la fase gaseosa del suelo en sondeos o perforaciones en el área de la presunta fuente de contaminación, de acuerdo con la guía para el muestreo de suelos (MINAM, 2014) (ver 2.4)²¹.

Fase de caracterización

◆ Suelo

En este caso se requiere:

- Delimitar la extensión horizontal y vertical de la contaminación mediante la

toma de muestras de suelos a profundidad (mediante sondeos, perforaciones, etc.) siguiendo las indicaciones de la guía para el muestreo de suelos (MINAM, 2014). Mayor información sobre el desarrollo de perforaciones en sitios contaminados y la toma de muestras a profundidad contiene además el ya citado manual de buenas prácticas en la investigación de sitios contaminados: muestreo de aguas subterráneas (MINAM, 2016b).

- Aplicar en caso de contaminación con COV, de forma complementaria al muestreo de suelos, técnicas innovadoras que permitan una delimitación detallada de la contaminación del subsuelo (investigaciones de alta resolución), como la realización de perforaciones de empuje directo (*direct-push*) con mediciones *in situ* utilizando sondas con membranas de interfaz (MIP, por su sigla en inglés)²².

◆ Aguas subterráneas

No corresponde para este tipo de contaminación

◆ Aire/fase gaseosa del suelo

En el caso de contaminación con COV se requiere:

- Profundización del muestreo de la fase gaseosa del suelo con el fin de delimitar las áreas con presencia de vapores y gases que puedan representar rutas de exposición. Sobre los tipos de muestreo a aplicarse ver lo indicado para la fase de identificación.
- Toma de muestras del aire en ambientes cerrados que representen potenciales puntos de exposición (por ejemplo, casas, estacionamientos subterráneos). Con este fin se pueden aplicar técnicas

20. Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM

21. Más detalles sobre este tipo de muestreo contiene, por ejemplo, la norma estadounidense ASTM D5314-92 (ASTM, 2006) y las normas alemanas de la Asociación de Ingenieros de Alemania (VDI), como VDI-Richtlinie 3865 (VDI, 2005 y VDI, 1998a).

22. Para mayor información sobre este tipo de muestreo ver, por ejemplo, la norma estadounidense ASTM D7352-07 (ASTM, 2007a).

de muestreo activas y pasivas²³.

- Instalación de pozos temporales o permanentes en la zona no saturada (zona vadosa) del suelo y realización de monitoreos periódicos.
- Desarrollo de ensayos de extracción de aire en los pozos temporales o permanentes con el fin de determinar el potencial de contaminación, y en vista de una posible remediación mediante extracción de aire del suelo (*Soil Vapor Extraction*) y el potencial de recuperación de contaminantes (cargas extraíbles).

Si se evidencian elevadas concentraciones de gases (metano, dióxido de carbono, etc.) en la fase gaseosa del suelo también debería realizarse:

- Medición de gases (metano, dióxido de carbono, hidrógeno sulfúrico) con medidores de campo de ambientes cerrados (casas, sótanos, alcantarillas, etc.). Estas mediciones se realizan en el área de la fuente de contaminación y su entorno con el propósito de determinar el riesgo de explosiones y de asfixia.
- Profundización de las mediciones y el muestreo en la fase gaseosa del suelo.

1.8.4. TIPO 3. CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA (ZONA SATURADA)

Este tipo corresponde a una contaminación del subsuelo similar a la de tipo 2, pero en este caso la contaminación del suelo llega hasta la franja capilar o a la zona saturada del suelo y genera una pluma de contaminación en las aguas subterráneas (ver recuadro). Los contaminantes en el agua se encuentran principalmente disueltos, a diferencia de los tipos 4 y 5 en los que hay presencia de contaminantes en fase libre.

DEFINICIONES

AGUA SUBTERRÁNEA AFECTADA

Aquella agua subterránea²⁴ cuyas funciones ecosistémicas se encuentran deterioradas o que presenta una calidad que no es apta para su uso por el hombre, como consecuencia de la alteración de sus características naturales por influencia antropogénica.

PLUMA DE CONTAMINACIÓN

En general, este término comprende aquella descarga visible o medible de un contaminante partiendo desde un punto de origen. En el caso de las aguas subterráneas, se denomina pluma de contaminación al acuífero que contiene el agua contaminada, que se origina por la infiltración de contaminantes al subsuelo.

Fuente: Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados, aprobados por el Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM.

En esta situación, los suelos contaminados no están necesariamente expuestos a la superficie, más bien pueden estar impermeabilizados por barreras físicas (pavimento, losas de concreto, edificaciones, etc.) o cubiertos con suelos o sustratos técnicos que evitan que las personas entren en contacto directo con el suelo contaminado.

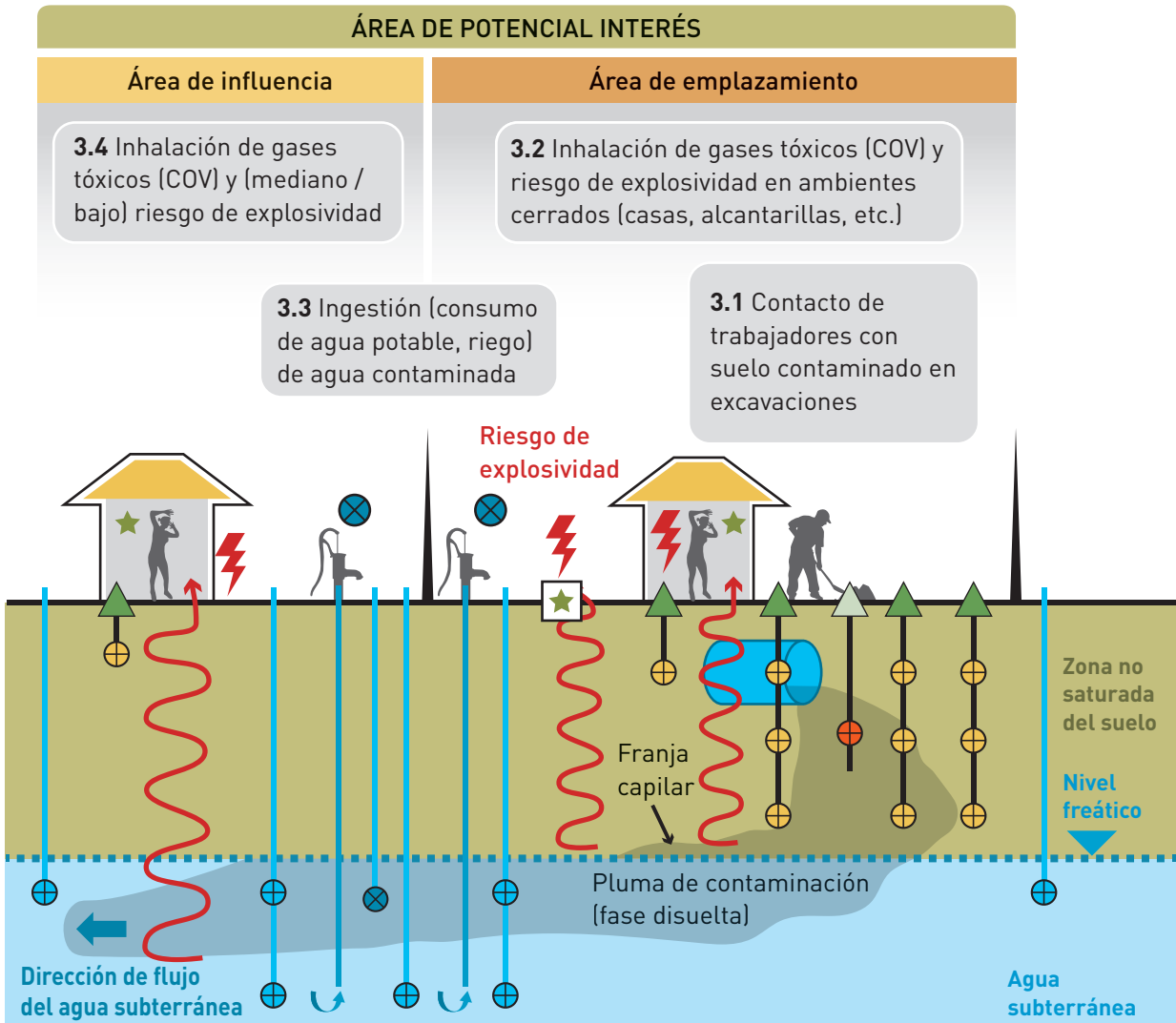
Este tipo de contaminación también comprende residuos enterrados que se consideran peligrosos o que contienen contaminantes. Se caracteriza por el transporte de contaminantes desde el suelo hacia las aguas subterráneas.








Los potenciales riesgos que puede generar resultan, en primer lugar, de manera indirecta,

23. Más información al respecto contienen, por ejemplo, las normas estadounidenses ASTM D7297-14 (ASTM, 2014b), ASTM D6345-10 (ASTM, 2010) y ASTM D6306-17 (ASTM, 2017).

24. Agua subterránea: Todas las aguas que se encuentran bajo la superficie del suelo en la zona de saturación y en contacto directo con el suelo o el subsuelo. Fuente: Texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001.

ILUSTRACIÓN 13. Tipo 3: contaminación del agua subterránea (zona saturada)



Muestreo	Suelo	Aguas subterráneas	Aire
Fase de Identificación	 Muestra de profundidad (zanjas, sondeos, perforaciones, etc.)	 Muestra de pozos de agua subterránea existentes  Perforaciones de piezómetros y muestreo de aguas subterráneas	 Fase gaseosa del suelo (muestreo en sondeos, PID, etc.)
Fase de caracterización	 Muestra de profundidad (zanjas, sondeos, perforaciones, etc.)	 Perforación de piezómetros (simples y multinivel) y muestreo de agua subterránea	 Fase gaseosa del suelo (muestreo en sondeos, PID, etc.)  Mediciones de aire (muestreo, PID) en ambientes cerrados (casas, etc.)

Fuente: elaboración propia basada en Marker, 2015.

como por la migración de contaminantes a través de la fase gaseosa del suelo o por el transporte de los contaminantes mediante el agua subterránea hacia los receptores.

Existen varios escenarios que pueden resultar en esta afectación de los acuíferos. Por un lado, los suelos contaminados o los residuos pueden encontrarse de forma permanente o periódica (por ejemplo, situación de aguas altas) en la zona saturada del suelo. Dependiendo de sus características físico-químicas, los contaminantes pueden disolverse en las aguas subterráneas y como consecuencia, se pueden formar plumas de contaminación en los acuíferos.

Por otro lado, los suelos contaminados o los residuos pueden encontrarse en la zona no saturada del suelo. Existen mecanismos que transportan los contaminantes hacia las aguas subterráneas, como una movilización por lixiviación, infiltración, percolación o un transporte por gravedad, lo que con frecuencia se observa en el caso de contaminación de fase libre. Las condiciones hidrogeológicas (profundidad del agua subterránea, permeabilidad de los estratos geológicos, tasas de infiltración, etc.), las características físico-químicas de los contaminantes (solubilidad, presión de vapor, etc.) y los procesos de sorción, retardación y degradación son factores que determinan si una contaminación del suelo en la zona no saturada puede causar una afectación en las aguas subterráneas.

En la ilustración 13 se puede apreciar una representación simplificada de este tipo de contaminación, las principales rutas y vías de exposición con un enfoque a receptores humanos y ejemplos para el muestreo de los diferentes componentes ambientales en las fases de identificación y de caracterización del sitio.

Ocurrencia

Este tipo de contaminación puede ocurrir en los siguientes casos:

- ◆ Sector minero-metálico
 - Disposición de desechos mineros (rela-

ves, desmontes, etc.) que contienen contaminantes (por ejemplo, metales pesados) en rellenos no controlados.

- Vertimiento de aguas contaminadas (por ejemplo, con metales) que se infiltran al subsuelo.

◆ Sector de hidrocarburos y energético

- Derrames de crudo de petróleo, combustible, diésel, etc. generados por accidentes de camiones, fugas en tuberías, tanques aéreos o subterráneos, pozos petroleros mal abandonados, etc., que se infiltran al subsuelo.
- Fosas de desechos petroleros (por ejemplo, aguas de formación, lodos de perforación con petróleo y metales) no controlados en la explotación petrolera.
- Disposición de residuos peligrosos o de residuos que contienen contaminantes provenientes de procesos petroleros o energéticos en rellenos no controlados.

◆ Sector industrial

- Disposición de residuos peligrosos o de residuos que contienen contaminantes provenientes de procesos industriales en rellenos no controlados.
- Vertimiento de aguas industriales contaminadas sobre el suelo con capacidad de infiltrarse al subsuelo (por ejemplo, aguas contaminadas con solventes aromáticos u organoclorados).
- Derrames de líquidos peligrosos o contaminados que se infiltran al subsuelo, generados por accidentes de camiones, fugas en tuberías, tanques superficiales o subterráneos, mal manejo de materiales y residuos peligrosos/contaminados, etc.

◆ Residuos sólidos domésticos

- Disposición no controlada de residuos domésticos en botaderos. En estos casos los botaderos pueden contener también residuos de otras fuentes (por ejemplo, industriales) que pueden constituir resi-

duos peligrosos o contaminados.

Rutas y vías de exposición de interés

Las principales rutas de migración para este tipo de contaminación son:

- ◆ Migración de gases tóxicos (por ejemplo, COV) y/o explosivos (por ejemplo, metano) a la superficie donde se pueden acumular en ambientes cerrados (casas, sótanos, alcantarillas, etc.). Este efecto puede presentarse en áreas por encima y en el entorno inmediato de la contaminación del subsuelo y, en menor grado, por encima de la pluma de contaminación en el agua subterránea.
- ◆ Migración de contaminantes a través de las aguas subterráneas. La contaminación puede ser transportada hacia áreas fuera del sitio contaminado donde puede afectarlas impidiendo su uso como agua potable, de riego, para lavado, fines comerciales o industriales. La extensión de las plumas de contaminación en las aguas subterráneas depende de muchos factores (tipo de contaminantes, hidrogeología, procesos de transformación, retardación y degradación, etc.). En algunos casos (por ejemplo, contaminación con solventes organoclorados en acuíferos con alta permeabilidad), la afectación del agua subterránea puede alcanzar hasta varios kilómetros de longitud.
- ◆ Infiltración de aguas subterráneas contaminadas a cuerpos de agua superficial (ríos, riachuelos, lagunas, lagos, mar, etc.).

Las principales vías de exposición son:

- ◆ Contacto directo (oral o dermal) de trabajadores con suelos contaminados en el caso de excavaciones profundas.
- ◆ Inhalación de gases tóxicos, sobre todo por acumulación de contaminantes volátiles (por ejemplo, BTEX, PCE o TCE) en ambientes cerrados.
- ◆ Riesgo de explosión: acumulación de sustancias inflamables y formación de mezclas de gases explosivos en ambientes cerrados

(por ejemplo, gases de combustibles o metano generado por residuos domésticos enterrados).

- ◆ Riesgo de asfixia: menor presencia del oxígeno en ambientes cerrados por la acumulación de gases como dióxido de carbono o metano (por ejemplo, generados por procesos de degradación de materia orgánica en botaderos de residuos domésticos).
- ◆ Ingestión de agua subterránea contaminada proveniente de pozos afectados por la pluma de contaminación. Dependiendo del tipo y del grado de contaminación del agua, pueden ser relevantes también el contacto dérmico con el agua y/o la inhalación de gases tóxicos.
- ◆ Ingestión de agua superficial afectada por filtraciones de aguas subterráneas contaminadas hacia cuerpos de agua superficial. Dependiendo del tipo y del grado de contaminación del agua, pueden ser relevantes también el contacto dérmico con el agua y/o la inhalación de gases tóxicos.
- ◆ Afectación de receptores ecológicos por la infiltración de aguas subterráneas contaminadas hacia cuerpos de agua superficial.

Tipos relevantes de uso del suelo

Este tipo de contaminación es relevante para:

- ◆ Suelos de uso industrial o residencial con presencia de edificaciones o de instalaciones subterráneas (alcantarillas, sótanos, pozos, etc.) donde se pueden acumular gases tóxicos y/o explosivos.
- ◆ Suelos en los que se realizan obras civiles con movimiento de tierras en el subsuelo, como excavaciones profundas (zanjas) para edificaciones, construcción de desagües, alcantarillas, tuberías de agua, etc.
- ◆ Aguas subterráneas que se usan como agua potable, para riego, con fines recreativos, o usos comerciales o industriales.
- ◆ Aguas superficiales afectadas por la infiltración de aguas subterráneas contaminadas.

Estrategia de muestreo

La estrategia del muestreo en un sitio con este tipo de contaminación puede incluir los aspectos que se explican a continuación.

Fase de identificación

- ◆ Suelo
- ◆ En este caso se debe comprobar o descartar la presencia de suelos contaminados o de residuos peligrosos enterrados a través de la toma de muestras a profundidad (sondeos, perforaciones, zanjas, calicatas, etc.) siguiendo las indicaciones de la guía para el muestreo de suelos²⁵ (MINAM, 2014). Mayor información sobre el desarrollo de perforaciones en sitios contaminados y la toma de muestras a profundidad se encuentra en el manual de buenas prácticas en la investigación de sitios contaminados: muestreo de aguas subterráneas (MINAM, 2016b).

◆ Agua subterránea

En este caso se recurre a medidas como:

- Recoger información hidrogeológica con base en estudios existentes (dirección del flujo del agua subterránea, perfil geológico, profundidad y variación del nivel freático, etc.).
- Identificar pozos de aguas subterráneas existentes (dentro y en el entorno inmediato del sitio) a partir de información documental y un levantamiento en campo. Determinar las características de los pozos identificados (ubicación, profundidad, tipo de revestimiento, etc.).
- Tomar muestras de aguas subterráneas en los pozos existentes (de preferencia ubicados aguas arriba, dentro y aguas abajo del sitio contaminado). Mayor información sobre el muestreo de pozos se ofrece en el manual de buenas prácticas en la investigación de sitios contaminados: muestreo de aguas subterráneas (MINAM, 2016b).

- En algunos casos puede ser recomendable instalar durante la fase de identificación uno o más piezómetros aguas abajo del sitio contaminado, con el fin de evaluar de forma preliminar una posible afectación de las aguas subterráneas. Esta información puede ser relevante para la planificación del alcance del muestreo de detalle (MD) en la fase de caracterización.

◆ Aire/fase gaseosa del suelo:

En el caso de presunta contaminación con COV y/o gases (metano, etc.) en la zona no saturada del suelo se aplica lo señalado para el tipo 2.

Fase de caracterización

◆ Suelo

En este caso se emplean medidas como:

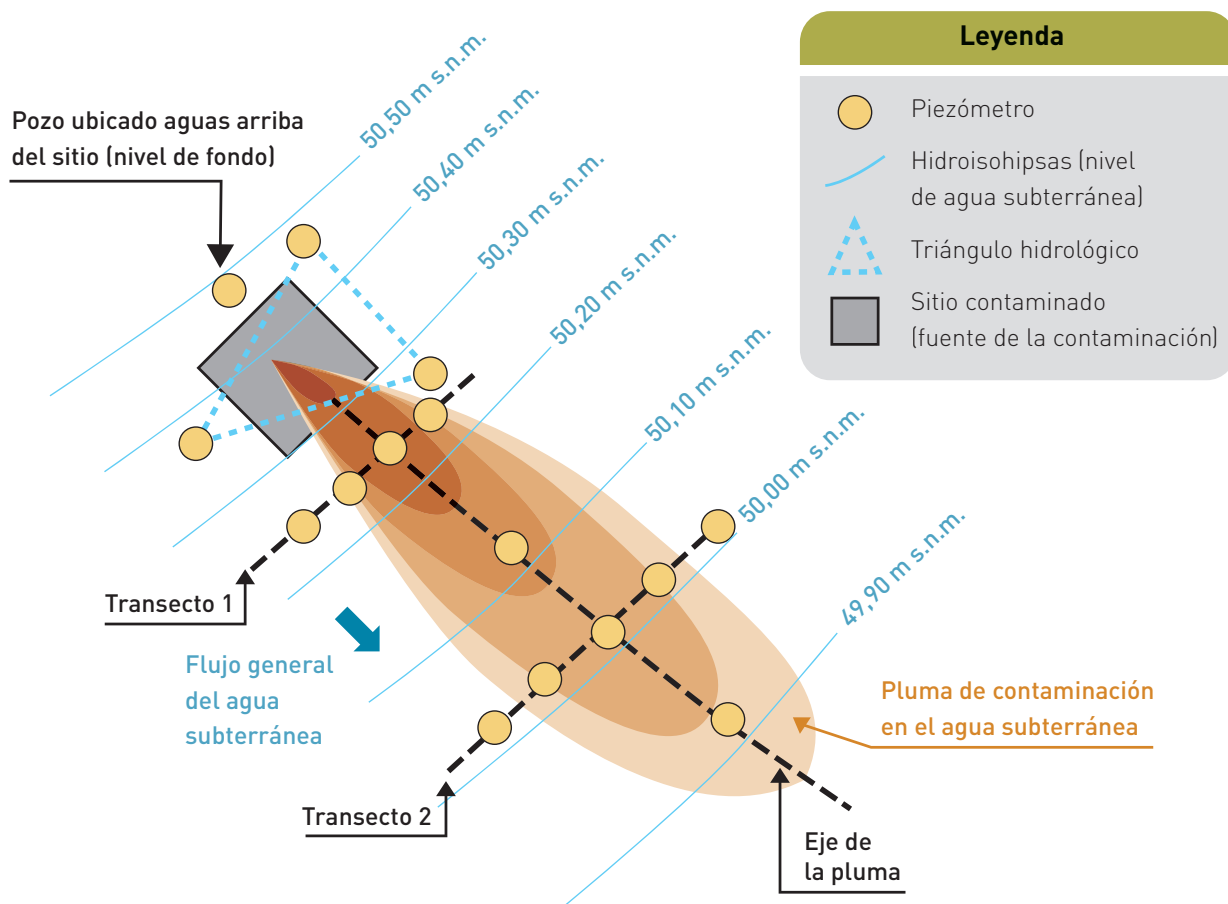
- Delimitar la extensión horizontal y vertical de la contaminación mediante la toma de muestras de suelos a profundidad (sondeos, perforaciones, etc.), siguiendo las indicaciones de la guía para el muestreo de suelos (MINAM, 2014). Mayor información sobre el desarrollo de perforaciones en sitios contaminados y la toma de muestras a profundidad ofrece, por ejemplo, el manual de buenas prácticas en la investigación de sitios contaminados: muestreo de aguas subterráneas (MINAM, 2016b).
- Aplicar, de forma complementaria al muestreo de suelos, técnicas innovadoras que permitan una delimitación detallada de la contaminación del subsuelo (investigaciones de alta resolución), como la realización de perforaciones de empuje directo con mediciones *in situ* mediante sondas con MIP²⁶.

◆ Agua subterránea

25. Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM

26. Para mayor información sobre este tipo de muestreo ver, por ejemplo, la norma estadounidense ASTM D7352-07 (ASTM, 2012b)

ILUSTRACIÓN 14. Pluma de contaminación en aguas subterráneas: ejemplo de ubicación de piezómetros para la caracterización



Elaboración propia.

En este caso se adoptan medidas como:

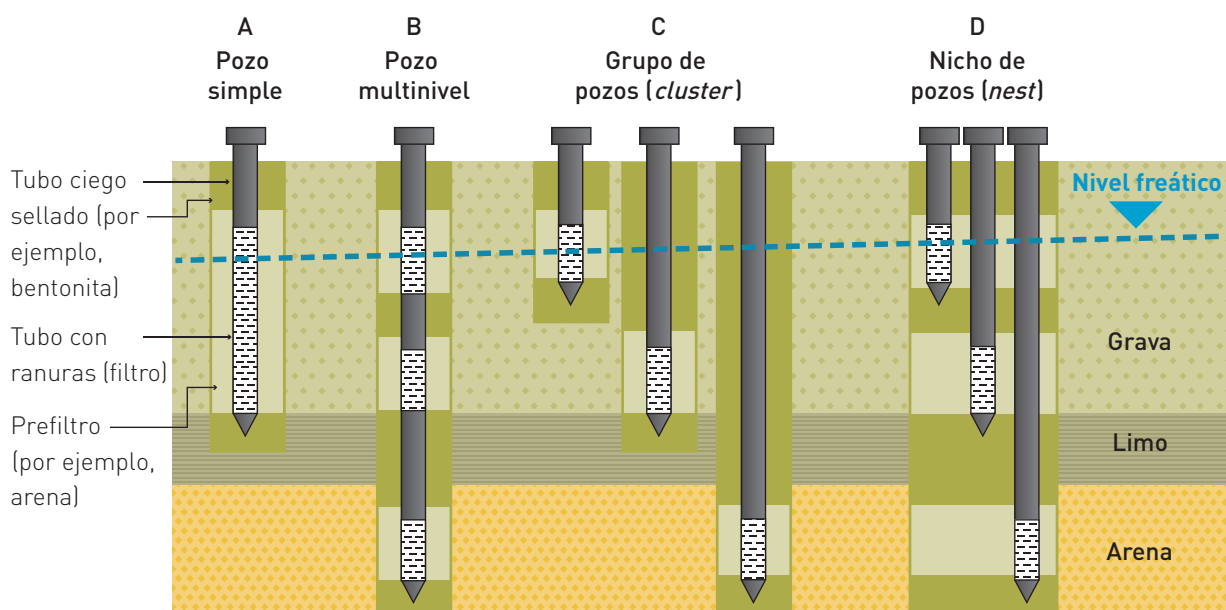
- Profundizar la información hidrogeológica (dirección del flujo del agua subterránea, perfil geológico, profundidad y variación del nivel freático, etc.) con base en estudios especializados.
- Instalar pozos subterráneos / piezómetros con el fin de caracterizar la pluma de contaminación. Para ello se consideran lo siguiente:
 - Colocación de, por lo menos, un piezómetro aguas arriba del sitio contaminado para descartar la presencia de contaminantes en el acuífero provenientes de una fuente de contaminación no relacionada con el sitio, o asociada a alteraciones naturales en la zona de estudio (por ejemplo, elevadas concentraciones de metales en el agua

subterránea de origen geogénico).

- Instalación de, por lo menos, tres piezómetros alrededor de la fuente de contaminación para determinar el flujo del agua subterránea. Estos tres pozos pueden servir también para la caracterización química de la contaminación en el acuífero.
- Instalación de piezómetros para delimitar la pluma de contaminación en su extensión horizontal y vertical. Para ello se deben ubicar pozos tanto a lo largo del eje de la pluma como a lo largo de transectos, es decir, de líneas perpendiculares al eje de la pluma. La ilustración 14 muestra un ejemplo de ubicación de pozos en el marco de la caracterización de una pluma de contaminación en las aguas subterráneas en la que la pro-

- fundidad se expresa en metros sobre el nivel del mar (m. s. n. m.).
- El revestimiento de los piezómetros (diámetro y material de los tubos, granulometría del prefiltro, etc.) dependerá de las características hidrogeológicas del sitio y del tipo de contaminación. Usualmente, se utilizan para la construcción de piezómetros tubos (ciegos y con ranuras) de policloruro de vinilo (PVC), no plastificado o rígido. Sin embargo, bajo ciertas condiciones en el sitio (por ejemplo, condiciones reductivas, contaminación con metales pesados, hidrocarburos, pesticidas, cetonas, compuestos de cloro o nitrógeno), puede ser necesario el empleo de tubos de otros materiales como acero inoxidable, politetrafluoroetileno, polietileno o polipropileno [AKGW, 2012: anexo 3].
 - La profundidad de los pozos y la ubicación de los filtros (tubos con ranuras) son factores que pueden influir significativamente en los resultados del muestreo del agua subterránea. Por ejemplo, en el caso de una contaminación que se encuentra principalmente en la parte superior del acuífero pueden darse falsos negativos si el filtro del pozo se ubica en la parte inferior de este. En ese sentido, el diseño de los pozos debe planificarse cuidadosamente considerando la hidrogeología del sitio, el tipo y la (supuesta) distribución de la contaminación en el acuífero, los objetivos de la evaluación y demás aspectos como limitaciones técnicas, accesibilidad de los puntos de perforación, aspectos financieros, etc.
 - Para lograr una caracterización vertical de la pluma de contaminación se instalan pozos que permitan la toma de muestras de agua subterránea en diferentes profundidades del acuífero. En la ilustración 15 se observan ejemplos de piezómetros con este fin. Los pozos simples no generan información sobre la distribución vertical de los contaminantes en el agua subterránea. El resultado del muestreo depende de la ubicación del filtro, que puede ser un filtro corto que representa sola-

ILUSTRACIÓN 15. Pluma de contaminación en aguas subterráneas: ejemplos de tipos de piezómetros (pozos) para la caracterización



Elaboración propia.

mente una parte específica del acuífero, o un filtro largo que da información integral sobre un horizonte o acerca de todo el acuífero. En cambio, los pozos multinivel, los grupos de pozos con filtros en diferentes profundidades o los nichos de pozos permiten la toma de muestras de aguas subterráneas en diferentes profundidades, lo que hace posible una caracterización vertical de la pluma.

- o Mayor información sobre la instalación de piezómetros, la purga, el desarrollo de los pozos y la toma de muestras de aguas subterráneas contiene el manual de buenas prácticas en la investigación de sitios contaminados: muestreo de aguas subterráneas (MINAM, 2016b).
- o Los pozos instalados deben nivelarse determinando la altura del borde superior del pozo en relación con un punto fijo, o en relación con un nivel geodésico de referencia para establecer la altura en metros sobre el nivel de mar. La precisión de la medición no debe superar $\pm 0,5$ centímetros. En los pozos nivelados se determina la profundidad de la napa freática mediante el uso de freatímetros. Con base en los datos obtenidos se construirán mapas de hidroisohipsas que describan la topografía del agua subterránea. En general, es recomendable repetir las mediciones de la profundidad de la napa en diferentes escenarios hidrológicos (aguas altas, aguas bajas, aguas medianas) con el fin de determinar cambios estacionales en el flujo del agua subterránea.

- ◆ De forma complementaria a la instalación de pozos se pueden aplicar técnicas innovadoras que permitan una delimitación detallada de la contaminación en el agua

DEFINICIONES

FASE LIBRE

Este término también se denomina “producto libre” y describe la presencia de sustancias no acuosas que se caracterizan por no formar mezclas con el agua o el suelo. Se utiliza frecuentemente para contaminaciones con hidrocarburos que flotan sobre un espejo de agua o que son visibles en la superficie del suelo.

Fuente: Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados, aprobados por el Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM

FASE LÍQUIDA NO ACUOSA LIGERA

Líquido inmiscible en agua de menor densidad que esta y que, por tanto, se presenta flotando sobre el nivel freático en procesos de contaminación de aguas subterráneas.

Fuente: Kaifer *et al.*, 2004).

subterránea (investigaciones de alta resolución), como la realización de perforaciones de empuje directo con mediciones *in situ* mediante sondas con membranas de interfaz (*Membrane Interphase Probe - MIP*) o sistemas que permiten la toma de muestras de agua subterráneas *in situ* en determinados intervalos²⁷.

- ◆ Aire/fase gaseosa del suelo

En el caso de contaminación con COV en la zona no saturada del suelo se aplica lo señalado para el tipo 2.

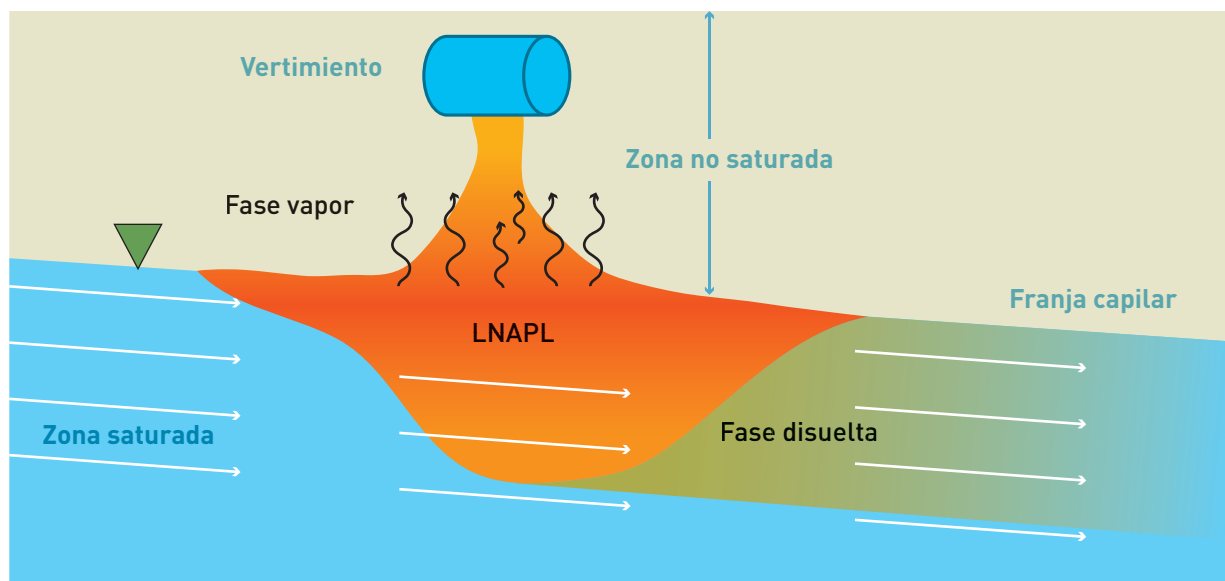
1.8.5. TIPO 4. CONTAMINACIÓN CON FASE LÍQUIDA NO ACUOSA LIGERA (LNAPL)

Este tipo describe una contaminación del subsuelo y de las aguas subterráneas con presencia de fase líquida no acuosa ligera (LNAPL, por su sigla en inglés).

Los LNAPL son líquidos que no se mezclan

27. Para mayor información sobre este tipo de muestreo ver, por ejemplo, la norma estadounidense ASTM D7352-07 (ASTM, 2007b).

ILUSTRACIÓN 16. Contaminación con fase líquida no acuosa ligera: modelo conceptual simplificado de filtración de gasolina en el subsuelo



Fuente: elaboración propia con base en Huntley & Beckett, 2002.

con el agua y, por tanto, forman una fase separada del agua subterránea. Asimismo, se caracterizan por ser menos densos que el agua, por lo que flotan sobre el agua subterránea y se denominan como de fase libre.

Ejemplos de LNAPL son:

- ◆ Gasolina
- ◆ Diésel
- ◆ Combustible de avión
- ◆ Fracciones ligeras de crudo de petróleo
- ◆ Lubricantes
- ◆ Aceites
- ◆ Solventes orgánicos (benceno, tolueno, etc.)
- ◆ Mezclas de diferentes compuestos hidrófobos

Los LNAPL más frecuentes son los combustibles y los aceites. Estos líquidos constituyen mezclas complejas de compuestos orgánicos como hidrocarburos alifáticos y aromáticos en diferentes proporciones. Pueden contener, además, aditivos que fortalecen o mejoran sus características como combustibles o lubricantes (Rivett *et al.*, 2014).

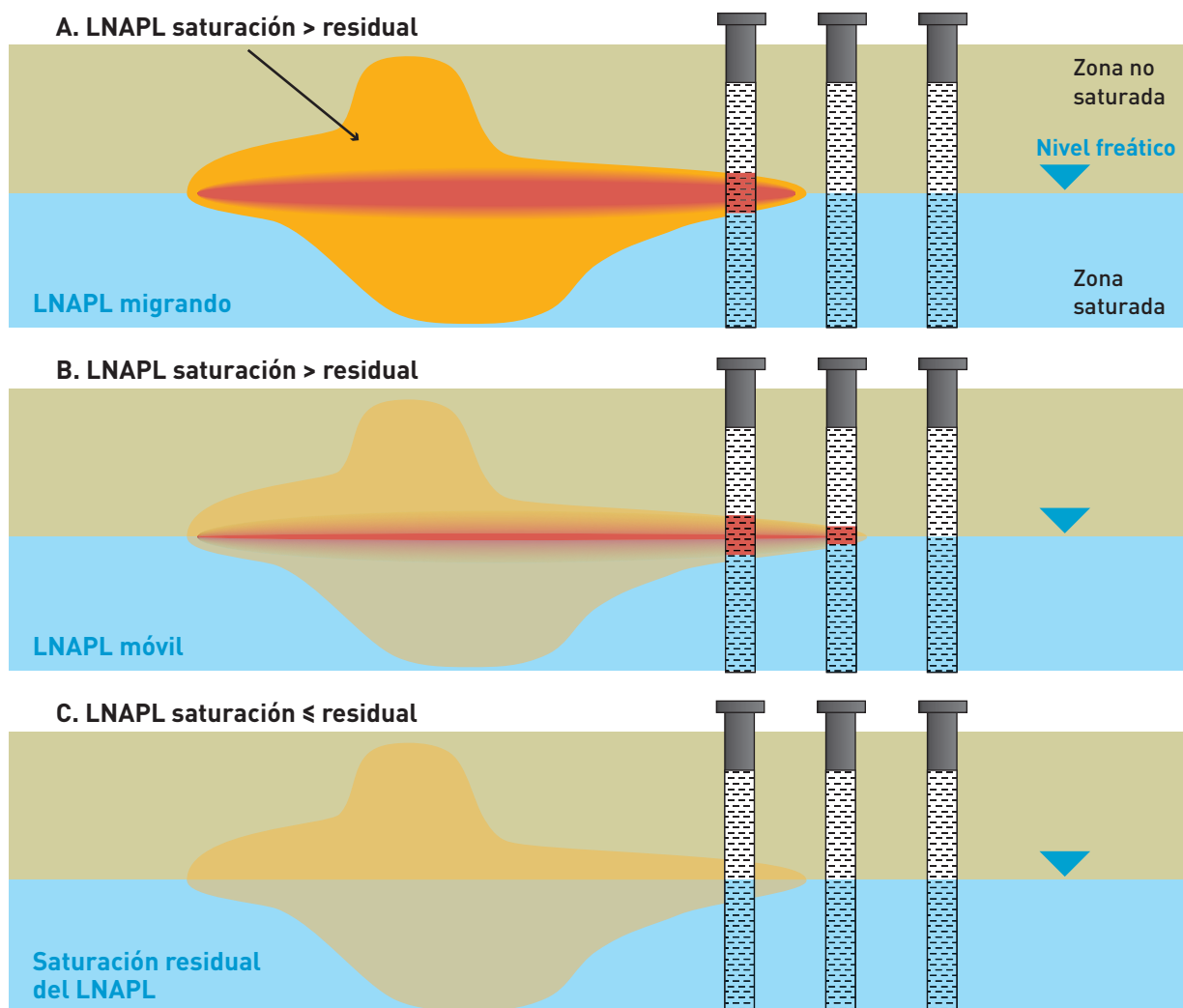
El comportamiento de los LNAPL en el subsuelo

es complejo, puesto que constituyen un sistema de flujo de tres fases: LNAPL, agua (sea subterránea, capilar o lixiviados) y aire (fase gaseosa del suelo). La ilustración 16 muestra un modelo conceptual simplificado de la distribución de un LNAPL en el subsuelo, en este caso originado por la liberación de gasolina de un tanque de combustible subterráneo derramado.

Desde la fuente de contaminación (por ejemplo, tanque subterráneo con fuga, derrame en tuberías/oleoducto), los LNAPL se infiltran al subsuelo y migran a través de la zona no saturada (vadosa) del suelo hasta llegar a estratos impermeables o al agua subterránea. El tipo de suelo (por ejemplo, grava, arena, limo, roca fracturada, etc.), su homogeneidad o heterogeneidad (por ejemplo, lentes de limo/arcilla en un suelo arenoso), la presencia de elementos antrópicos (fundamentos, tuberías, canales, etc.), la hidrogeología del lugar y las características físico-químicas del líquido liberado influyen, entre otros factores, sobre el transporte de los LNAPL en la zona no saturada.

Con frecuencia, este tipo de contaminación se caracteriza por una acumulación de líquidos hidrófobos cerca del nivel freático como «capas flo-

ILUSTRACIÓN 17. Saturación de fase líquida no acuosa ligera: escenarios mayor, igual y menor a la saturación residual



Fuente: adaptado de ITRC, 2009

tantes». Esta acumulación de LNAPL tiene el potencial de migrar lateralmente (quizás infiltrando cuerpos de agua superficial), o puede redistribuirse verticalmente por fluctuaciones del nivel freático, también puede ocurrir en contra de la dirección de flujo del agua subterránea, puesto que su transporte está principalmente controlado por gravedad. Otros factores importantes que determinan la migración de los LNAPL en el subsuelo son, por ejemplo, la carga de desplazamiento de estos elementos en comparación con los fluidos existentes en los poros de suelo (agua o aire) y el grado de saturación de la fase libre en el suelo, en especial si supera o no la saturación residual.

Este último aspecto se aprecia en la ilustración 17 que presenta tres diferentes escenarios de

saturación de LNAPL en el subsuelo (elaborada con base en un modelo del ITRC). Se debe señalar que como «saturación de LNAPL» se entiende la fracción de la porosidad total del suelo que ha sido llenada con esos elementos (por ejemplo, el 10 % de saturación de LNAPL significa que 10 % de los poros totales del suelo contienen LNAPL).

En la ilustración presentada:

- ◆ La sección A expone la situación antes de que la liberación de los LNAPL haya sido detectada. El cuerpo de los LNAPL está migrando como consecuencia del avance de estos por la gravedad.
- ◆ La sección B refleja una situación en la

que la liberación de los LNAPL se ha detenido y el frente de estos se ha disipado. Si se instalase un piezómetro en el cuerpo de los LNAPL se podría observar una acumulación de fase libre en el pozo; sin embargo, estos han dejado de migrar (extenderse) lateralmente.

- ◆ La sección C muestra la situación en la que los LNAPL están en condiciones de saturación residual, es decir, en un rango de saturación mayor a cero hasta el punto de saturación en el que la presión capilar de los LNAPL es igual a la presión de entrada a los poros del suelo. Esto incluye la saturación máxima de los LNAPL por debajo de la cual esta es discontinua e inmóvil en el gradiente aplicado. En el caso de una saturación igual o menor a la saturación residual no se acumulará fase libre en los piezómetros, a no ser que el nivel freático baje y los LNAPL atrapados bajo el mismo, puedan fluir dentro del pozo.

Típicamente, la migración de los LNAPL en el subsuelo se detiene en periodos relativamente cortos, y su extensión lateral se limita con frecuencia a las áreas cercanas a la fuente de contaminación. Sin embargo, a partir del foco de contaminación con LNAPL puede ocurrir una transferencia de masas hacia la fase gaseosa y/o acuosa del subsuelo. En el primer caso se generan vapores de COV en la zona no saturada del suelo, y en el segundo se producen plumas de contaminación con COV disueltos en el agua subterránea (Rivett *et al.*, 2014). En su forma disuelta, los contaminantes pueden ser transportados con el flujo del agua subterránea y, en consecuencia, las plumas de contaminación pueden extenderse a considerables áreas aguas abajo de la fuente de contaminación. En este contexto se debe considerar que los efec-

tos de la degradación natural de los contaminantes pueden desempeñar un papel importante en la extensión de la pluma²⁸.

En la ilustración 18 se aprecia una presentación simplificada del tipo de contaminación con LNAPL, las principales rutas y vías de exposición con un enfoque a receptores humanos, y ejemplos de muestreo de los diferentes componentes ambientales en las fases de identificación y de caracterización del sitio.

Ocurrencia

Este tipo de contaminación puede ocurrir, por ejemplo, en los siguientes casos:

- ◆ Sector minero-metálico
 - Almacenamiento de combustibles / diésel: derrames en tanques aéreos o subterráneos, tuberías, accidentes durante el transporte y/o la manipulación de combustibles.
- ◆ Sector de hidrocarburos y energético
 - Actividades de explotación o beneficio (por ejemplo, refinerías): derrames de crudo de petróleo, combustible, diésel, etc., generados por accidentes de camiones, fugas en tuberías, tanques aéreos o subterráneos, pozos petroleros mal abandonados, etc., que se infiltran al subsuelo.
 - Estaciones de servicio / grifos: fugas en tanques subterráneos, tuberías, dispensadores, etc., de combustibles / diésel; pérdidas de combustible durante el abastecimiento de tanques o vehículos, y la manipulación de combustibles.
- ◆ Sector industrial
 - Almacenamiento de combustibles / diésel o de solventes orgánicos (por ejemplo, benceno, tolueno o hexano), derrames en

28. Estudios internacionales, algunos de los cuales se citan en una publicación del sobre la atenuación natural controlada y degradación de contaminantes en la remediación de aguas subterráneas y suelos (KORA, por sus siglas en alemán), señalan que la mayoría de las plumas con BTEX o hidrocarburos de petróleo no llegan a los 300 metros de longitud (Schiedeck *et al.*, 1997; Mace *et al.*, 1997 y Rice *et al.*, 1995 en Wabbles *et al.*, 2008). Para acuíferos en California, Rice *et al.* (1995) determinaron que estadísticamente el 99 % de las plumas con benceno no superan los 190 metros.

Mayor información sobre los principios de comportamiento, migración y transporte de los LNAPL en el subsuelo se encuentra en Newell *et al.*, 1995; Rivett *et al.*, 2014; e ITRC, 2009.

tanques aéreos o subterráneos, tuberías, accidentes durante el transporte y/o la manipulación de los líquidos.

- ◆ Botaderos y áreas degradadas por la acumulación inadecuada de residuos sólidos
 - Disposición inadecuada de LNAPL en rellenos de residuos o botaderos, por ejemplo, por enterramiento de barriles con residuos de solventes orgánicos, aceites usados, lubricantes, etc.

Rutas y vías de exposición de interés

Las principales rutas de migración para este tipo de contaminación son:

- ◆ Migración de gases tóxicos (por ejemplo, compuestos orgánicos volátiles) y/o explosivos (por ejemplo, vapores de combustibles) a la superficie en la que se pueden acumular en ambientes cerrados (casas, sótanos, alcantarillas, etc.). Este efecto puede darse en áreas por encima y en el entorno inmediato de la contaminación del subsuelo y, en menor grado, por encima de la pluma de contaminación en el agua subterránea.
- ◆ Migración a través de las aguas subterráneas, la cual puede ser transportada hacia áreas fuera del sitio contaminado impidiendo su uso como agua potable, para riego, lavado, fines comerciales o industriales. La extensión de las plumas de contaminación en aguas subterráneas depende de muchos factores (tipo de contaminantes, hidrogeología, procesos de transformación, retención y degradación, etc.).
- ◆ Infiltración de LNAPL o aguas subterráneas contaminadas a cuerpos de agua superficial (ríos, riachuelos, lagunas, lagos, mar, etc.).
- ◆ Infiltración de LNAPL a instalaciones subterráneas (canales, sótanos, estacionamientos, etc.).

Las principales vías de exposición son:

- ◆ Contacto directo (oral o dermal) de trabajadores con los LNAPL en el caso de excavaciones.

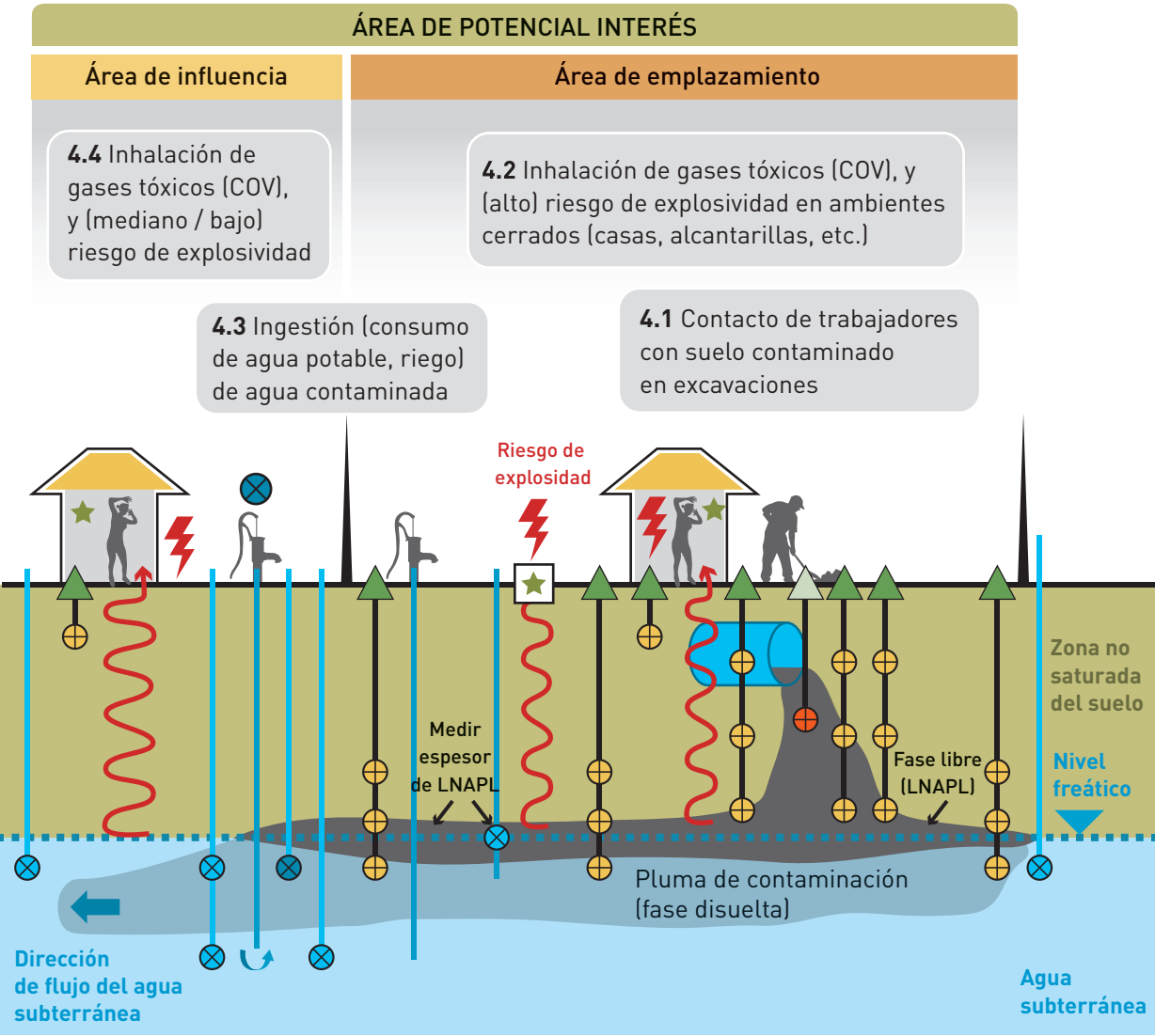
- ◆ Inhalación de gases tóxicos, sobre todo por acumulación de contaminantes volátiles (por ejemplo, BTEX) en ambientes cerrados.
- ◆ Riesgo de explosión: acumulación de sustancias inflamables y formación de mezclas de gases explosivos en ambientes cerrados (por ejemplo, gases de combustibles).
- ◆ Riesgo de asfixia: menor presencia del oxígeno en ambientes cerrados por la acumulación de gases como dióxido de carbono o metano (por ejemplo, generados por procesos de degradación de los LNAPL).
- ◆ Ingestión de agua subterránea contaminada proveniente de pozos afectados por la pluma de contaminación. Dependiendo del tipo y del grado de contaminación del agua, puede ser relevante también el contacto dérmico con el agua y/o la inhalación de gases tóxicos.
- ◆ Ingestión de agua superficial contaminada, la cual puede generarse por la infiltración de los LNAPL, o de aguas subterráneas contaminadas, en cuerpos de aguas superficiales, como manantiales, ríos, riachuelos, lagunas, lagos, etc. Dependiendo del tipo y del grado de contaminación del agua, puede ser relevante también el contacto dérmico con el agua y/o la inhalación de gases tóxicos.
- ◆ Afectación de receptores ecológicos por la infiltración de los LNAPL o de aguas subterráneas contaminadas hacia cuerpos de agua superficial.

Tipos relevantes de uso del suelo

Este tipo de contaminación es relevante para:

- ◆ Suelos de uso industrial o residencial con presencia de edificaciones o de instalaciones subterráneas (alcantarillas, sótanos, pozos, etc.) en las que se pueden acumular gases tóxicos y/o explosivos.
- ◆ Suelos en los que se realizan obras civiles con movimiento de tierras en el subsuelo, como excavaciones profundas (zanjas) para edificaciones, construcción de desagües, alcantarillas, tuberías de agua, etc.

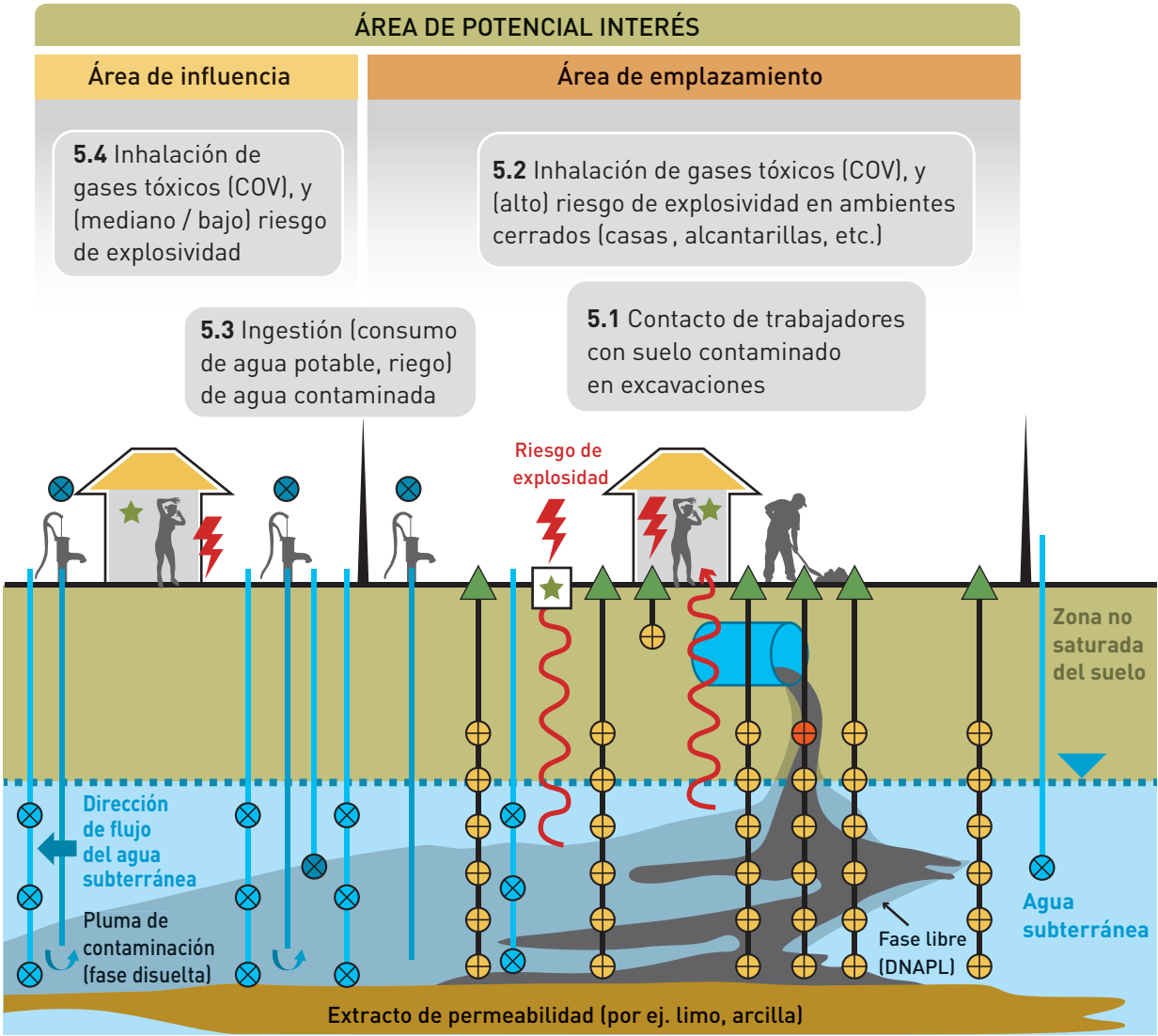
ILUSTRACIÓN 18. Tipo 4: contaminación con fase líquida no acuosa ligera



Muestreo	Suelo	Aguas subterráneas	Aire
Fase de Identificación	Muestra de profundidad (zanjas, sondeos, perforaciones, etc.) 	Muestra de pozos existentes Perforaciones de piezómetros y muestreo de agua subterránea LNAPL: medir espesor 	Fase gaseosa del suelo (muestreo en sondeos, PID, etc.)
Fase de caracterización	Muestra de profundidad (sondeos, perforaciones, empuje directo / MIP, etc.) 	Perforación de piezómetros (simples y multinivel) y muestreo del AS; LNAPL: medir espesor, analizar composición 	Fase gaseosa del suelo (muestreo en sondeos, PID, etc.) Mediciones de aire (muestreo, PID) en ambientes cerrados (casas, etc.)

Fuente: elaboración propia con base en Marker, 2015.

ILUSTRACIÓN 19. Tipo 5: contaminación con fase líquida no acuosa pesada



Muestreo	Suelo	Aguas subterráneas	Aire
Fase de Identificación	Muestra de profundidad (zanjas, sondeos, perforaciones, etc.) 	Muestra de pozos existentes Perforaciones de piezómetros y muestreo del agua subterránea DNAPL: medir espesor 	Fase gaseosa del suelo (muestreo en sondeos, PID, etc.)
Fase de caracterización	Muestra de profundidad (sondeos, perforaciones, empuje directo / MIP, etc.) 	Perforación de piezómetros (simples y multinivel), y muestreo de arsénico; DNAPL: medir espesor, analizar composición 	Fase gaseosa del suelo (muestreo en sondeos, PID, etc.) Mediciones de aire (muestreo, PID) en ambientes cerrados (casas, etc.)

Fuente: elaboración propia con base en Marker, 2015.

- ◆ Aguas subterráneas que se usan como agua potable, para riego, con fines recreativos o usos comerciales o industriales.
- ◆ Aguas superficiales afectadas por infiltración de los LNAPL o de aguas subterráneas contaminadas.

Estrategia de muestreo

La estrategia de muestreo en un sitio con este tipo de contaminación puede incluir los aspectos que se presentan a continuación.

Fase de identificación

◆ Suelo

En este caso corresponde comprobar o descartar la presencia de LNAPL en el suelo, a través de la toma de muestras a profundidad (sondeos, perforaciones, zanjas, calicatas, etc.), siguiendo las indicaciones de la guía para el muestreo de suelos²⁹ (MINAM, 2014). Mayor información sobre el desarrollo de perforaciones en sitios contaminados y la toma de muestras a profundidad se encuentra además en el manual de buenas prácticas en la investigación de sitios contaminados: muestreo de aguas subterráneas (MINAM, 2016b).

◆ Agua subterránea

Se aplica lo señalado para el tipo 3.

◆ Aire/fase gaseosa del suelo

Se aplica lo señalado para el tipo 3.

Fase de caracterización

◆ Suelo

En este caso se hace necesario:

- Delimitar la extensión horizontal y vertical de los LNAPL mediante la toma de muestras de suelos a profundidad (sondeos, perforaciones, etc.), siguiendo las indicaciones de la guía para el muestreo

de suelos (MINAM, 2014). Mayor información sobre el desarrollo de perforaciones y la toma de muestras a profundidad se encuentra en el ya citado manual de buenas prácticas en la investigación de sitios contaminados: muestreo de aguas subterráneas (MINAM, 2016b).

- Aplicar de forma complementaria al muestreo de suelos técnicas innovadoras que permitan una delimitación detallada de la contaminación del subsuelo (investigaciones de alta resolución), como la realización de perforaciones de empuje directo con mediciones *in situ* mediante sondas con MIP³⁰.

◆ Agua subterránea

Para la caracterización de la contaminación en el agua subterránea aplicar lo señalado para el tipo 3. Además, se considera lo siguiente:

- En los piezómetros con presencia de fase libre se determina el espesor de la capa de los LNAPL mediante un medidor de interfaces.
- No se toman muestras del agua subterránea de pozos que evidencian presencia de fase libre porque al hacerlo se puede mezclar el agua subterránea con los LNAPL con lo que los resultados no serán representativos de la concentración de contaminantes en el agua subterránea.
- En el caso de presencia de fase libre en un pozo se puede tomar una muestra de los LNAPL con el fin de caracterizar su composición a través de un análisis químico en laboratorio (por ejemplo, con la cromatografía de gases y la espectometría de masa o GC/MS-Screening).

1.8.6. TIPO 5. CONTAMINACIÓN CON FASE LÍQUIDA NO ACUOSA PESADA

29. Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM

30. Para mayor información sobre este tipo de muestreo ver, por ejemplo, la norma estadounidense ASTM D7352-07 (ASTM, 2007b).

DEFINICIONES

FASE LÍQUIDA NO ACUOSA PESADA (DNAPL)

Líquido inmiscible en agua de mayor densidad y que, por tanto, en procesos de contaminación de aguas subterráneas tiende a hundirse en la zona saturada y a acumularse en la base del acuífero.

Fuente: Kaifer *et al.*, 2004.

(DNAPL)

Este tipo describe una contaminación del subsuelo y de las aguas subterráneas con presencia de DNAPL.

Los DNAPL son líquidos que no se mezclan con el agua y, por tanto, forman una fase separada del agua subterránea. Se caracterizan por ser más densos que el agua y, por ende, se infiltran al agua subterránea.

Ejemplos de DNAPL son:

- ◆ Solventes organoclorados (PCE, TCE).
- ◆ Alquitrán (residuo de coquerías).
- ◆ Crudos extra pesados: aquellos que en la escala del American Petroleum Institute (API) tienen una gravedad de API menor a 10.
- ◆ PCB.
- ◆ Mercurio.

En la ilustración 19 se aprecia una presentación simplificada del tipo de contaminación con DNAPL, las principales rutas y vías de exposición con un enfoque a receptores humanos y ejemplos de muestreo de los diferentes componentes ambientales en las fases de identificación y de caracterización del sitio.

Ocurrencia

Este tipo de contaminación puede ocurrir por ejemplo en los siguientes casos:

- ◆ Sector minero-metálico

- Minería artesanal / pequeña minería aurífera: derrames, accidentes, etc., con mercurio metálico que se utiliza como insumo para la amalgamación; vertimiento intencional de aguas o residuos con mercurio metálico al suelo.
- Actividades mineras que utilizan mercurio metálico como insumo (por ejemplo, minería artesanal / pequeña minería aurífera) o que generan el mercurio metálico como producto o subproducto (liberación del mercurio al ambiente por derrames, accidentes, vertimientos intencionales, pérdidas en el almacenamiento o en la manipulación del mercurio, etc.).
- Actividades mineras y de beneficio que utilizan solventes organoclorados como insumos (por ejemplo, para el desengrase de piezas metálicas): liberación de los solventes al ambiente por derrames, accidentes, vertimientos intencionales, pérdidas en el almacenamiento o la manipulación de los solventes, etc.
- Transformadores con aceites de PCB: derrames, pérdidas al suelo.
- ◆ Sector de hidrocarburos y energético
 - Actividades de explotación o beneficio (por ejemplo, refinerías): derrames de crudo extra pesado generados por accidentes de camiones, fugas en tuberías, tanques aéreos o subterráneos, pozos petroleros mal abandonados, etc., que se infiltran al subsuelo.
 - Transformadores con aceites de PCB: derrames, pérdidas al suelo.
- ◆ Sector industrial y de servicios
 - Actividades industriales en las que se utilizan solventes organoclorados (por ejemplo, PCE o TCE), como industria metal-mecánica, galvanotecnia y siderúrgica (uso de los solventes para el desengrase de piezas metálicas) e industria textil, entre otros.
 - Lavanderías al seco: uso de solventes organoclorados como tetracloroetileno

para el lavado de prendas de ropa al seco.

- ◆ Botaderos y áreas degradadas por la acumulación inadecuada de residuos sólidos
 - Disposición inadecuada de DNAPL en rellenos de residuos o botaderos, por ejemplo, por enterramiento de barriles con residuos de solventes orgánicos pesados.

Rutas y vías de exposición de interés

Las principales rutas de migración para este tipo de contaminación son:

- ◆ Migración de gases tóxicos (por ejemplo, tricloroetileno, tetracloroetileno, cloruro de vinilo, naftaleno) a la superficie en la que se pueden acumular en ambientes cerrados (casas, sótanos, alcantarillas, etc.). Este efecto puede ocurrir en áreas por encima y en el entorno inmediato de la contaminación del subsuelo y, en menor grado, por encima de la pluma de contaminación en el agua subterránea.
- ◆ Migración de contaminantes a través de las aguas subterráneas. La contaminación puede ser transportada hacia áreas fuera del sitio contaminado, donde puede impedir el uso del agua subterránea como agua potable, riego, así como con fines comerciales o industriales. La extensión de las plumas de contaminación en las aguas subterráneas depende de muchos factores (tipo de contaminantes, hidrogeología, procesos de transformación, retardación y degradación, etc.).
- ◆ Infiltración de los DNAPL o aguas subterráneas contaminadas a cuerpos de agua superficial (ríos, riachuelos, lagunas, lagos, mar, etc.).
- ◆ Infiltración de los DNAPL a instalaciones subterráneas (canales, sótanos, estacionamientos, etc.).

Las principales vías de exposición son:

- ◆ Contacto directo (oral o dermal) de trabajadores con los DNAPL en el caso de excavaciones.
- ◆ Inhalación de gases tóxicos, sobre todo por

acumulación de contaminantes volátiles (por ejemplo, tricloroetileno, tetracloroetileno, cloruro de vinilo, naftaleno) en ambientes cerrados.

- ◆ Riesgo de asfixia: reemplazo del oxígeno en ambientes cerrados por la acumulación de gases como dióxido de carbono o metano (por ejemplo, generados por procesos de degradación de los DNAPL).
- ◆ Ingestión de agua subterránea contaminada proveniente de pozos afectados por la pluma de contaminación. Dependiendo del tipo y del grado de contaminación del agua, pueden ser relevantes también el contacto dérmico con el agua y/o la inhalación de gases tóxicos.
- ◆ Ingestión de agua superficial contaminada que puede generarse por la infiltración de los DNAPL o de aguas subterráneas contaminadas hacia cuerpos de aguas superficiales, como manantiales, ríos, riachuelos, lagunas, lagos, etc. Dependiendo del tipo y del grado de contaminación del agua, pueden ser relevantes también el contacto dérmico con el agua y/o la inhalación de gases tóxicos.
- ◆ Afectación de receptores ecológicos por la infiltración de los DNAPL o de aguas subterráneas contaminadas hacia cuerpos de agua superficial.

Tipos relevantes de uso del suelo

Este tipo de contaminación es relevante para:

- ◆ Suelos de uso industrial o residencial con presencia de edificaciones o de instalaciones subterráneas (alcantarillas, sótanos, pozos, etc.) en las que se pueden acumular gases tóxicos.
- ◆ Suelos donde se realizan obras civiles con movimiento de tierras en el subsuelo, como excavaciones profundas (zanjas) para edificaciones, construcción de desagües, alcantarillas, tuberías de agua, etc.
- ◆ Aguas subterráneas que se usan como agua potable, para riego, con fines recreativos o usos comerciales o industriales.

- ◆ Aguas superficiales afectadas por la infiltración de los DNAPL o de aguas subterráneas contaminadas.

Estrategia de muestreo

La estrategia de muestreo en un sitio con este tipo de contaminación puede incluir los aspectos que se describen a continuación.

Fase de identificación

◆ Suelo

En este caso se ejecutan medidas como:

- Comprobar o descartar la presencia de los DNAPL en el suelo a través de la toma de muestras a profundidad (sondeos, perforaciones, zanjas, calicatas, etc.) siguiendo las indicaciones de la guía para el muestreo de suelos³¹ (MINAM, 2014). Mayor información sobre el desarrollo de perforaciones en sitios contaminados y la toma de muestras a profundidad se encuentra en el manual de buenas prácticas en la investigación de sitios contaminados: muestreo de aguas subterráneas (MINAM, 2016b).
- En el caso de una presunta contaminación con DNAPL es importante tener en cuenta que esta puede llegar a grandes profundidades, lo que se debe considerar en la selección de la técnica de muestreo (tipo de perforaciones, etc.).

◆ Agua subterránea

Se aplica lo señalado para el tipo 3, pero considerando que los DNAPL pueden generar contaminación profunda en los acuíferos.

◆ Aire/fase gaseosa del suelo

Se aplica lo señalado para el tipo 3.

Fase de caracterización

◆ Suelo

En este caso se hace necesario:

- Delimitar la extensión horizontal y vertical de los DNAPL mediante la toma de muestras de suelos a profundidad (son-

deos, perforaciones, etc.) siguiendo las indicaciones de la guía para el muestreo de suelos (MINAM, 2014). Mayor información sobre el desarrollo de perforaciones en sitios contaminados y la toma de muestras a profundidad se encuentra en el manual de buenas prácticas en la investigación de sitios contaminados: muestreo de aguas subterráneas (MINAM, 2016b).

- Aplicar de forma complementaria al muestreo de suelos técnicas innovadoras que permitan una delimitación detallada de la contaminación del subsuelo (investigaciones de alta resolución), como la realización de perforaciones de empuje directo con mediciones *in situ* mediante MIP³².

◆ Agua subterránea

Se aplica lo señalado para el tipo 3. Además, se considera lo siguiente:

- En los piezómetros con presencia de fase libre se determina el espesor de la capa de los DNAPL mediante un medidor de interfaces.
- No se toman muestras del agua subterránea de pozos que muestran presencia de fase libre porque al hacerlo la muestra del piezómetro puede mezclar el agua subterránea con los DNAPL y los resultados no serán representativos de la concentración de contaminantes en el agua subterránea.
- En el caso de presencia de fase libre en un pozo se puede tomar una muestra de los DNAPL con el fin de caracterizar su composición a través de un análisis químico en laboratorio (por ejemplo, GC/MS-Screening).

Esta revisión de la tipología de contaminación y de las estrategias de muestreo ofrece una visión general de la evaluación y de la gestión de sitios contaminados que permite profundizar en el contenido de las fases de ese proceso.

31. Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM

32. Para mayor información sobre este tipo de muestreo ver, por ejemplo, la norma estadounidense ASTM D7352-07 (ASTM, 2012b).



Fase de identificación de sitios contaminados

(2)

Este capítulo, referido a la fase de identificación de sitios contaminados, presenta los objetivos y alcance, la evaluación preliminar, el muestreo de identificación, el muestreo del nivel de fondo, los criterios para determinar la necesidad de continuarla, y las características del IISC.

2.1. Objetivos y alcance

La fase de identificación tiene por finalidad verificar o descartar la presencia de sitios contaminados.

Esta fase se desarrolla en dos etapas: *evaluación preliminar* (EP) y *muestreo de identificación* (MI). Al final de cada etapa se determina la necesidad de continuar con la evaluación del sitio; en tal sentido, si los resultados de la EP permiten descartar la presencia de un sitio contaminado no se requerirá el desarrollo del MI. En cambio, si se identificaran durante la EP sospechas, indicios o evidencias de contaminación en el sitio, se requerirá el desarrollo del MI cuyo alcance estará en función de los resultados obtenidos durante la EP (ver 2.2.3). También será necesario optar por el desarrollo del MI si existieran dudas o faltara información suficiente sobre los usos anteriores del sitio que permitan descartar la presencia de contaminación en

este. Los resultados de la fase de identificación determinan la necesidad de continuar con la fase de caracterización. Más adelante se definen los criterios técnicos aplicables para determinar esta necesidad. El alcance de la fase de caracterización, por ejemplo en lo que se refiere a tipos de muestreo, componentes ambientales que deben evaluarse durante el MD, etc., dependerá de los resultados obtenidos durante la fase de identificación (EP y MI) y del MCS que se desarrolla con base en estos resultados³³.

Un aspecto a tomar en consideración es que *en sitios que hayan sido previamente identificados como sitios contaminados con base en evidencias obtenidas en campo o muestreos se podrá prescindir de la fase de identificación*³⁴. Estas evidencias en campo pueden ser hallazgos visuales en el sitio que reflejan la contaminación del suelo, como presencia de residuos peligrosos depositados o enterrados de forma in-

33. Mayor información al respecto se puede encontrar en la introducción y los capítulos 1 y 2 de la presente guía.

34. Numeral 5.2 del artículo 5 de los Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados, aprobados por el Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM.

controlada en el sitio, o presencia de líquidos peligrosos, como crudo de petróleo, combustibles o solventes orgánicos derramados sobre la tierra, entre otros. Los hallazgos deben ser idóneos y suficientemente probados para evidenciar la presencia de un sitio contaminado. Si existiesen dudas acerca de ellos se desarrolla la fase de identificación de acuerdo con los lineamientos que se definen en esta guía.

Otro motivo para prescindir del desarrollo de esta fase es que existiesen resultados químicos de suelos obtenidos por muestreos históricos que comprueben una superación del ECA para suelo o de los NdF.

En estos dos casos se puede omitir el desarrollo de la fase de identificación y continuar directamente con la de caracterización. De ser así, se requerirá recolectar toda la información necesaria para el desarrollo del MCS en la fase de caracterización. Esto incluye un análisis de la historia del sitio, la identificación de las áreas y de los contaminantes de potencial interés y toda la información adicional requerida para la realización de un MD representativo.

2.2. Evaluación preliminar

En la EP se determina la existencia de indicios o evidencias de contaminación en el sitio. Con este fin, se realiza una investigación histórica para recopilar y analizar información sobre los antecedentes del sitio y las actividades potencialmente contaminantes para el suelo asociadas a este. Además, se genera información de campo a través del levantamiento técnico (inspección) del sitio en evaluación, sin que ello implique la toma de muestras ambientales.

A partir del análisis de esta información se determinan las áreas de potencial *interés* (Apl) y se desarrolla el MCS preliminar, considerando los siguientes elementos:

- ◆ Potenciales fuentes y focos de contaminación
- ◆ Contaminantes de potencial Interés (Cpl)

DEFINICIONES

ÁREA DE POTENCIAL INTERÉS

Se trata de áreas identificadas durante la Fase de Identificación en las cuales existen indicios o evidencias de contaminación del suelo sobre el cual se realizarán las labores de muestreo.

CONTAMINANTE DE POTENCIAL INTERÉS

Cualquier sustancia química susceptible de causar efectos nocivos para la salud de las personas o el ambiente, asociada a las actividades antrópicas que se desarrollan o desarrollaron en el sitio bajo estudio. Son aquellas sustancias en las cuales se enfoca el muestreo de identificación y el muestreo de detalle, tras las conclusiones de la evaluación preliminar.

Fuente: Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados, aprobados por el Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM.

- ◆ Posibles rutas y vías de exposición
- ◆ Potenciales receptores

Si como resultado de la EP no se encuentran indicios o evidencias de contaminación en el sitio se concluye con la fase de identificación, sin ser necesario continuar con el MI ni las siguientes fases de evaluación.

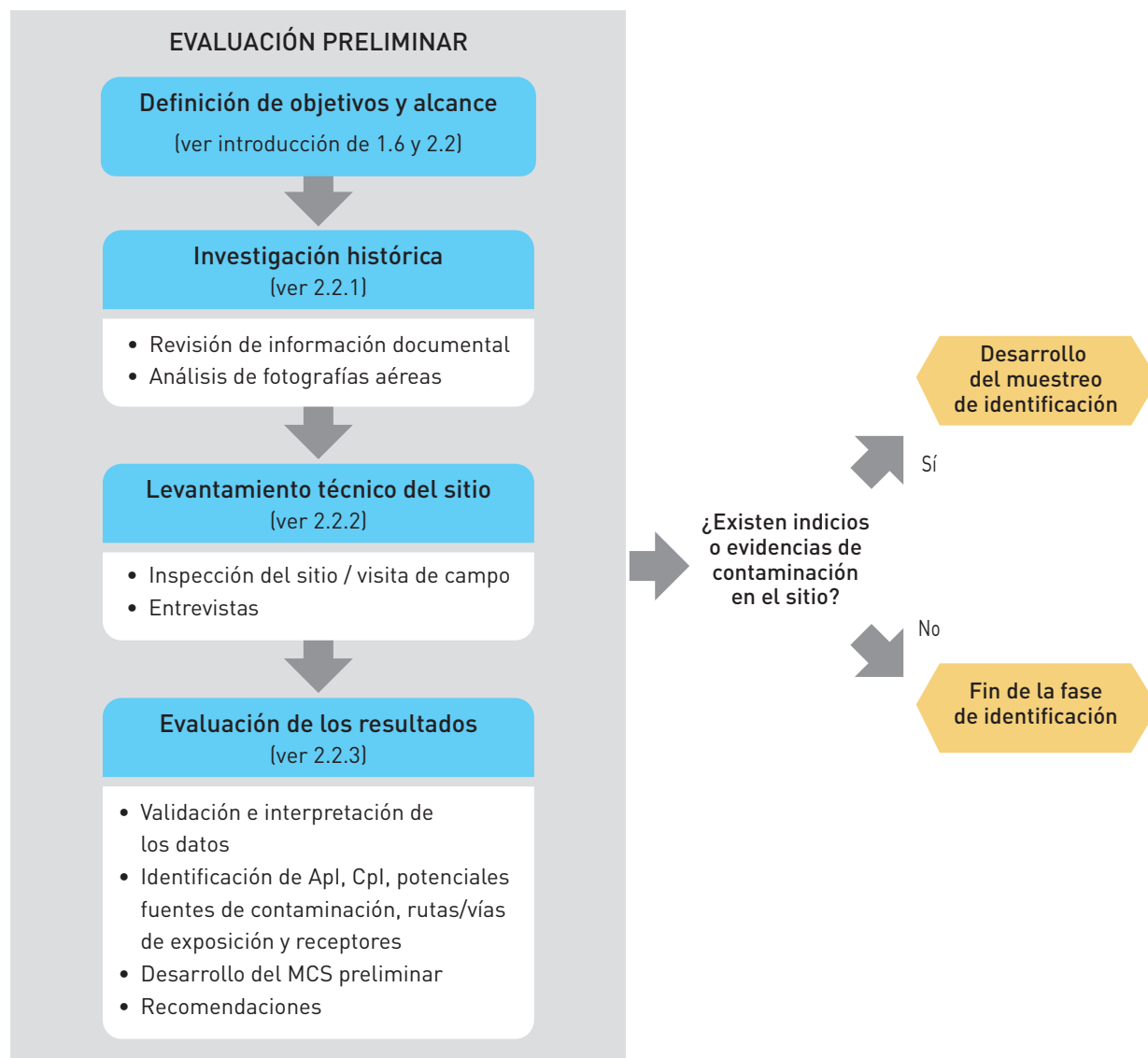
En la ilustración 20 se pueden observar los elementos claves para el desarrollo de la EP.

2.2.1. INVESTIGACIÓN HISTÓRICA

Una forma eficaz de obtener indicios o evidencias de contaminación del suelo es a través de una investigación histórica del sitio, de acuerdo con los procedimientos y los criterios aplicables para ejecutar esta tarea.

La condición actual de un sitio es consecuencia de las actividades que se han desarrollado en él. El conocimiento de su historia permite decidir si es necesario continuar con las siguientes

ILUSTRACIÓN 20. Evaluación preliminar en sitios potencialmente contaminados: secuencia en flujograma



Elaboración propia.

etapas de evaluación que confirmen o descarten la contaminación en el suelo, porque la historia del sitio permite identificar las áreas que pueden estar contaminadas por actividades u operaciones pasadas.

Los resultados de la investigación histórica constituyen insumos fundamentales para definir el alcance del MI, puesto que se trata de información que aporta para definir los Cpl y las Apl existentes en el sitio, y son datos relevantes para el desarrollo del MCS, el cual constituye la base para la realización de un muestreo representativo si fuese necesario.

Como se verá a continuación, la investigación histórica puede recurrir a distintas fuentes de información.

Revisión de información documental

Esta tarea consiste en reunir y revisar documentos sobre el sitio y sus actividades para obtener la siguiente información:

- ◆ Datos generales del sitio, como su denominación popular, dirección postal, código catastral, coordenadas UTM-WGS84, área (metros cuadrados o hectáreas), altitud (m s. n. m.), estatus de propiedad, etc.

- ◆ Evolución cronológica de los usos y la ocupación del sitio: derechos de propiedad, tipos de operaciones, competencias administrativas, licencias de funcionamiento y ambientales, etc.
 - ◆ Tipos y ubicación de los principales procesos productivos y operaciones desarrollados en cada actividad; lo que incluye la localización de plantas, infraestructura (pistas, edificios, etc.), instalaciones (tanques, pozas, etc.) y otras áreas relevantes como almacenes o lugares de acopio.
 - ◆ Uso y manejo de materiales y residuos potencialmente contaminantes para el suelo; lo que incluye la identificación de sustancias o grupos de sustancias asociadas a las actividades actuales y pasadas (insumos, productos/subproductos, residuos).
 - ◆ Tipo de superficies (por ejemplo, pavimento, concreto, suelo desnudo) y de suelo en el sitio (por ejemplo, arena, grava, relleno antrópico).
 - ◆ Características y gestión de las emisiones a la atmósfera, efluentes líquidos y residuos sólidos generados por cada actividad.
 - ◆ Identificación de áreas de disposición de residuos.
 - ◆ Eventos significativos ocurridos en el sitio que pudieran haber provocado un impacto sobre este (por ejemplo, accidentes o incendios).
 - ◆ Características geológicas, como (de estar disponibles) topografía, geología regional y local (formaciones geológicas, estratos y rocas), perfiles geológicos de perforaciones o sondeos, o información edafológica.
 - ◆ Información hidrogeológica e hidrológica, como (de estar disponible):
 - Características hidrogeológicas e hidrológicas generales (carga/descarga regional, tipo de acuíferos, permeabilidad del subsuelo, etc.).
 - Identificación de piezómetros / pozos de aguas subterráneas en el sitio y su entorno.
 - Información básica sobre los pozos, como ubicación, coordenadas UTM-WGS84, profundidad, revestimiento (diámetro, ubicación de filtros y tubos ciegos, tipo de prefiltro, etc.) o perfil geológico, entre otros aspectos.
 - Planos de hidroisohipsas y perfiles hidrogeológicos.
 - Datos sobre la profundidad y la variación estacional de la napa freática, la dirección y la velocidad del flujo, el espesor del agua subterránea y el rendimiento del acuífero.
 - Parámetros hidráulicos del acuífero: coeficiente de permeabilidad, transmisividad, porosidad efectiva, dispersividad, pendiente hidráulica, velocidad de flujo, etc.
 - Profundidad y espesor del acuitardo o acuícludo (estratos poco o muy poco permeables).
 - Resultados de los análisis físico-químicos del agua subterránea.
 - Ubicación de las aguas receptoras (ríos, arroyos, etc.), lagunas, lagos y manantiales en el entorno del sitio.
 - ◆ Uso de aguas superficiales y subterráneas en el sitio y su entorno (por ejemplo, para riego, consumo humano o uso industrial).
 - ◆ Otras características naturales del sitio sobre clima, fauna y flora, etc.
- No es común encontrar registros específicos sobre el sitio, pero el evaluador deberá consultar el mayor número de fuentes para obtener un conocimiento amplio, contrastar estos datos y validarlos. En la tabla 6 se presenta una relación de algunos tipos de documentos que se pueden consultar y la información relevante a obtener. Las fuentes de información histórica de un sitio pueden ser:
- ◆ Fuentes documentales oficiales: propietario del predio, instituciones y entidades gubernamentales del ámbito regional y municipal distrital o provincial para la obtención de los registros de agua, electricidad y drenaje, procedimientos por denuncias y sanciones, registro público de la propiedad.

TABLA 6. Investigación histórica: documentos de consulta y fuentes

TIPO DE DOCUMENTO	INFORMACIÓN RELEVANTE	EJEMPLOS DE FUENTES
Mapas, planos, fotografías aéreas o imágenes satelitales de alta definición	Ubicación del sitio, superficie ocupada, topografía e hidrología, usos del suelo en el sitio y su entorno para distintos años.	<ul style="list-style-type: none"> Instituto Geográfico Nacional (www.ign.gob.pe) Fuerza Aérea del Perú (https://www.fap.mil.pe/) Geoservidor del MINAM (http://geoservidor.minam.gob.pe/) Google Earth o Google Maps (https://earth.google.es/ https://www.google.com.pe/maps) Municipalidad distrital o provincial Mapa Nacional de Cobertura Vegetal (MINAM, 2015) Mapa Nacional de Ecosistemas (MINAM, 2018)
Mapas y estudios geológicos e hidrogeológicos	Características geológicas e hidrogeológicas locales y regionales.	<ul style="list-style-type: none"> Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (http://www.ingemmet.gob.pe) Autoridad Nacional del Agua (www.ana.gob.pe) Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (www.sedapal.com.pe) o empresas similares
Catastro de pozos y derechos de uso del agua subterránea	Ubicación de piezómetros / pozos, aptitud y usos locales del agua subterránea.	<ul style="list-style-type: none"> Autoridad Nacional del Agua (ANA) (www.ana.gob.pe) Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (www.sedapal.com.pe) o empresas similares
Libros y revistas y que brinden referencias históricas sobre la localidad y sus actividades productivas	Uso y ocupación del suelo en la localidad.	<ul style="list-style-type: none"> Biblioteca Nacional del Perú (www.bnp.gob.pe) Bibliotecas locales, públicas, universitarias o privadas y repositorios y archivos nacionales e internacionales
Registros de la actividad y la producción industrial y agropecuaria	Datos históricos de producción de las actividades de interés: materias primas y productos, volúmenes de producción, tecnologías y procesos.	<ul style="list-style-type: none"> Instituto Nacional de Estadística e Informática (www.inei.gob.pe) Autoridad competente nacional, dependiendo del tipo de actividad, por ejemplo: <ul style="list-style-type: none"> Ministerio de Energía y Minas (www.minem.gob.pe) Ministerio de la Producción (www.produce.gob.pe) Ministerio de Vivienda (www.vivienda.gob.pe). Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (www.sunat.gob.pe) Gobierno regional y municipalidad distrital o provincial Empresas que operan u operaron en el sitio
Registros de disposición final de residuos sólidos municipales y residuos peligrosos	Localización de áreas de disposición final de residuos dentro y fuera del sitio.	<ul style="list-style-type: none"> Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria (Digesa) del Ministerio de Salud (www.digesa.minsa.gob.pe/) Dirección General de Residuos Sólidos del MINAM (www.minam.gob.pe) Municipalidad distrital o provincial Empresas que operan u operaron en el sitio

TIPO DE DOCUMENTO	INFORMACIÓN RELEVANTE	EJEMPLOS DE FUENTES
Registros de incendios y accidentes químicos	Identificación de áreas afectadas por accidentes en el sitio y su entorno.	<ul style="list-style-type: none"> Municipalidad distrital o provincial Ministerio del Ambiente (www.minam.gob.pe) Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú Medios de comunicación Empresas que operan u operaron en el sitio Inventario nacional de áreas degradadas por residuos sólidos municipales del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA)"
Registros de quejas y denuncias de vecinos (posibles perjuicios producidos por las actividades que se han desarrollado en el sitio)	Identificación de potenciales impactos ambientales generados por las actividades desarrolladas en el sitio.	<ul style="list-style-type: none"> Municipalidad distrital o provincial Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (www.oefa.gob.pe) Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria del Ministerio de Salud (www.digesa.minsa.gob.pe/) Medios de comunicación Entidades de fiscalización ambiental Reporte de conflictos sociales de la Defensoría del Pueblo y la Secretaría de Gestión Social y Diálogo del Viceministerio de Gobernanza Territorial de la Presidencia del Consejo de Ministros
Instrumentos de gestión ambiental, licencias de funcionamiento y autorizaciones	Línea base de proyectos emplazados en el área, identificación de procesos y operaciones, su ubicación dentro del sitio, potenciales impactos ambientales y de salud generados por las actividades desarrolladas en el sitio.	<ul style="list-style-type: none"> Autoridad competente nacional, dependiendo del tipo de la actividad, por ejemplo: <ul style="list-style-type: none"> Ministerio de Energía y Minas (www.minem.gob.pe) Ministerio de la Producción (www.produce.gob.pe) Ministerio de Vivienda (www.vivienda.gob.pe) Autoridad Nacional del Agua (www.ana.gob.pe) Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (www.sunat.gob.pe) Gobierno regional y municipalidad distrital o provincial Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles (Senace)
Registros de denuncias de accidentes laborales, intoxicaciones y otras afecciones a la salud vinculadas al sitio	Identificación de potenciales impactos en la salud generados por las actividades desarrolladas en el sitio.	<ul style="list-style-type: none"> Dirección General de Trabajo del Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo (www.trabajo.gob.pe) Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria del Ministerio de Salud (www.digesa.minsa.gob.pe) Centro Nacional de Salud Ocupacional y Protección del Ambiente (https://web.ins.gob.pe/es/salud-ocupacional-y-proteccion/salud-ocupacional/censopas/presentacion) Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (www.osinergmin.gob.pe) Municipalidad distrital o provincial
Registro de conflictos laborales en las actividades desarrolladas en el sitio.	Identificación de cambios en los procesos productivos (clausuras, suspensión temporal de actividades, cambios de tecnología, variación en volúmenes de producción) y en las condiciones de salud laboral.	<ul style="list-style-type: none"> Municipalidad distrital o provincial Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (www.oefa.gob.pe) Dirección General de Trabajo del Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo (www.trabajo.gob.pe) Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria del Ministerio de Salud (www.digesa.minsa.gob.pe)

TIPO DE DOCUMENTO	INFORMACIÓN RELEVANTE	EJEMPLOS DE FUENTES
		<ul style="list-style-type: none"> Centro Nacional de Salud Ocupacional y Protección del Ambiente (https://web.ins.gob.pe/es/salud-ocupacional-y-proteccion/salud-ocupacional/censopas/presentacion) Medios de comunicación Entidades de fiscalización ambiental
Resultados de monitoreos ambientales históricos	Análisis químicos de contaminantes y de otros parámetros en matriz de suelos, residuos, agua superficial y subterránea, sedimentos, aire y biota	<ul style="list-style-type: none"> Monitoreos ambientales realizados por titulares, autoridades (ANA, OEFA, Digesa, etc.), organismos nacionales e internacionales

Elaboración propia.

- ◆ Fuentes documentales no oficiales: universidades, empresas consultoras, periódicos, revistas, registros de la empresa sobre los eventos relacionados con la contaminación en el sitio, expedientes, autorizaciones de construcción, permisos de descarga u otros.
- ◆ Fuentes no documentales válidas: testimonios orales, por ejemplo, entrevistas a extrabajadores y pobladores del sitio o empleados municipales.

En resguardo de la fiabilidad de la investigación resulta imprescindible que en el IISC se reporten en detalle las fuentes y los documentos de cada una de las informaciones obtenidas sobre el sitio. Si no fuese posible determinar una información requerida, por ejemplo datos sobre la hidrogeología del sitio o la existencia de pozos de agua subterránea, se debe señalar que esta información no estaba disponible, indicando también las fuentes y las instituciones consultadas al respecto³⁵.

Asimismo, la información que respalda la investigación histórica debe estar correctamente referenciada, siguiendo metodologías internacionalmente reconocidas para el manejo de

ACCESO A LAS FUENTES

Se pueden solicitar documentos e informaciones de estas fuentes mediante comunicaciones formales o acceso a la información pública por sus diversas vías. Es recomendable guardar constancia de las solicitudes de información y de sus respuestas.

fuentes y citas bibliográficas en la redacción de documentos técnicos.

Análisis de fotografías aéreas y/o de imágenes satelitales

El término «fotografías aéreas» se refiere a fotografías tomadas desde una plataforma aérea (usualmente un avión, un helicóptero o un dron), y que cuentan con una resolución suficiente para permitir identificar el desarrollo de usos y actividades en el área de estudio.

Fuentes oficiales para fotografías aéreas actuales e históricas son el Instituto Geográfico Nacional o la Fuerza Aérea del Perú; sin embargo, para algunas zonas del país pueden

35. Por ejemplo: «Existencia de pozos de agua subterránea en el entorno del sitio: información no disponible. Fuentes consultadas: Autoridad Nacional del Agua, Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima y vecinos (entrevistas)».

existir otras fuentes, como colecciones privadas o museos.

La forma más sencilla de acceder a imágenes satelitales es a través de servicios *en línea*, como Google Earth, Google Maps o Bing Maps. No obstante, en numerosas situaciones, puede ser necesario comprar imágenes satelitales con mayor resolución para poder determinar infraestructuras u otros elementos que indiquen los usos y las potenciales fuentes de contaminación en el área de estudio.

Solo existen imágenes satelitales de alta resolución para el pasado reciente. Si se requiriese determinar el historial de un sitio a lo largo de las últimas décadas se debe indagar por fotografías aéreas, las cuales pueden estar disponibles para tiempos más antiguos, usualmente desde la década de 1930.

Un método valioso para identificar cambios en el sitio bajo estudio es el análisis multitemporal. En esta técnica, se analizan fotografías aéreas o imágenes satelitales de diferente antigüedad. De ser posible, se recomienda analizar fotografías en un lapso de cinco años. En determinadas circunstancias, puede ser necesario evaluar periodos más cortos; sin embargo, la disponibilidad de fotografías históricas y su calidad pueden ser, en numerosas ocasiones, los factores que determinan los intervalos de análisis.

Un ejemplo de este tipo de análisis se puede apreciar en las fotografías aéreas de un sitio industrial en la ciudad de São Paulo, Brasil, tomadas en 1973 y 1986 (ilustración 21), que muestran claramente que las áreas B y C sufrieron un cambio de uso entre ambos años.

En el área B, se observa que la laguna que existía en 1973 ha sido llenada con residuos sólidos. En el marco de la evaluación del sitio deberían caracterizarse los residuos que se han dispuesto en ese relleno. Esta tarea debe incluir una revisión de la información documental disponible. Si esta información no fuese suficiente se deben tomar muestras representativas de los residuos dispuestos. La fotografía

CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LAS FOTOGRAFÍAS AÉREAS

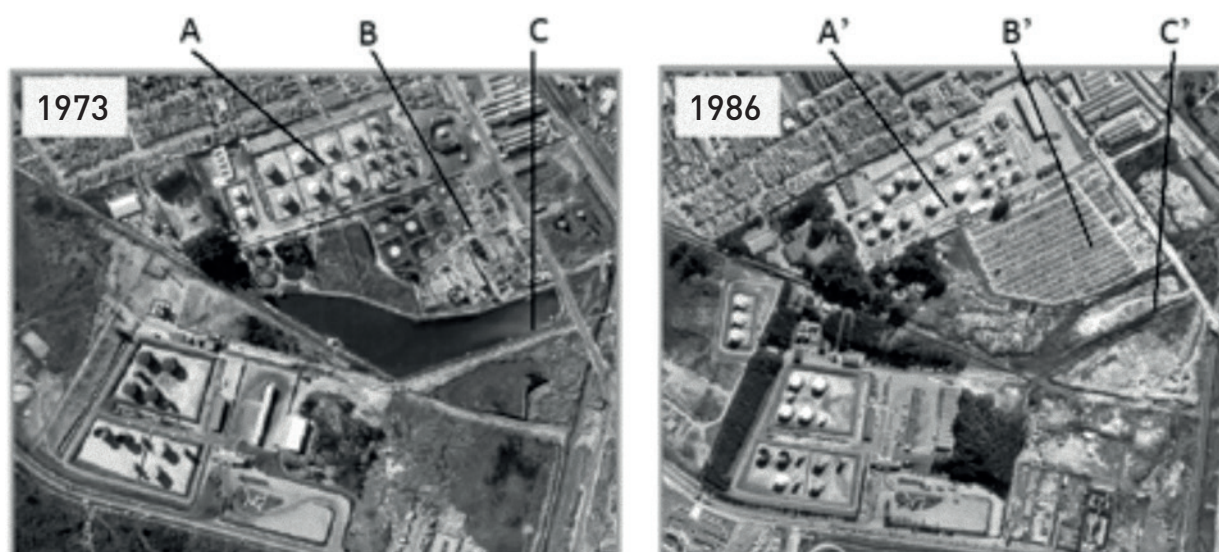
- Cobertura del reconocimiento aéreo.
- Calidad de las fotografías (nitidez, contraste, etc.).
- Estación del año / clima.
- Fecha: por defecto, cada cinco años (de estar disponibles); dependiendo del escenario, pueden ser necesarios intervalos más cortos.
- Utilizar fotografías originales o la primera copia de la fotografía original, ya que en copias múltiples del original pueden perderse detalles importantes.

aérea de 1973 indica claramente el área de la laguna posteriormente rellena. Así, la fotografía histórica ayuda a delimitar el área para el muestreo (= Apl).

Comparativamente, se puede observar que, entre 1973 y 1986, el área de la exrefinería (área C) fue convertida en depósito de vehículos. En esta situación, sería necesario evaluar y reportar si hubo remediación del área antes de su conversión; de no ser así, se deberá considerar esta área como un Apl que requiere el desarrollo de evaluaciones adicionales con el fin de comprobar o descartar la presencia de contaminación en el área. Como puede verse, el análisis multitemporal de fotografías aéreas es muy útil para la Investigación histórica de antiguos rellenos, sobre todo si no existe información documental sobre su ubicación y extensión y el tiempo de disposición de los residuos. En estos casos, el análisis de fotografías aéreas puede ser la única fuente de información y es recomendable que incluya también fotografías aéreas del momento inmediatamente anterior al inicio y a la culminación del relleno.

Para sitios de usos comerciales, industriales, mineros o petroleros es recomendable utilizar el análisis multitemporal de fotografías aéreas

ILUSTRACIÓN 21. Fotografías aéreas para investigación histórica: comparación de un área industrial en São Paulo, Brasil, 1973-1986



Izquierda: A. Base de almacenamiento de combustibles. B. Refinería de petróleo desactivado. C. Laguna
Derecha: A. Base de almacenamiento de combustibles. B. Depósito de vehículos. C. Área de disposición de residuos (botadero).

Fuente: elaboración con base en Marker, 2012.

en los siguientes casos:

- ◆ Se trata de sitios grandes (> 1 hectárea).
- ◆ Existieron diferentes usos potencialmente contaminantes en el sitio.
- ◆ El historial y los usos anteriores del sitio no se conocen.

En estos casos, el análisis multitemporal puede proporcionar valiosa información adicional a la revisión de la información documental en la investigación histórica de sitio.

Para el examen detallado de fotografías aéreas es necesario identificar diferentes elementos ópticos, lo que requiere conocimientos especializados y mucha experiencia por parte del evaluador. Por este motivo es recomendable contratar para esta tarea a empresas especializadas.

En general, existen dos formas de realizar el análisis de las fotografías aéreas: por fotografías individuales (análisis monoscópico) o por fotografías estereográficas (análisis estereoscópico).

En el primer caso, cada fotografía se visualiza

con lupas (usualmente con aumento de escala 10x o 30x) o, si están en formato digital, se utilizan programas gráficos especializados. En el segundo caso, se requiere de pares de fotografías estereográficas, que se traslapan de tal manera que sea posible realizar un análisis estereoscópico. Para ello se necesita un estereoscopio de espejos con lupa telescópica, lo que permite determinar la altura y las diferencias de altura, profundidad y volumen de los elementos ópticos identificados, como huecos, montículos, etc.

Los rellenos antiguos pueden identificarse a través de atributos característicos en las imágenes como:

- ◆ Ubicación espacial y distribución
- ◆ Trazado
- ◆ Dimensiones
- ◆ Valores de color y de gris
- ◆ Textura / estructura
- ◆ Indicadores indirectos: como daños en la vegetación o interrelaciones de infraestructura

TABLA 7. Fotografías aéreas para investigación histórica: clasificación de elementos ópticos en el análisis

Categoría principal	Categoría secundaria	Asignación de funciones (ejemplos)
Áreas de actividades económicas (industriales, comerciales, mineras, petroleras, etc.)	Edificio	Administración, almacén, talleres
	Plantas de producción	Tanques
	Sistemas lineares	Tuberías, pistas, ferrovías
	Depósitos / almacenes	Chatarra
Antiguos rellenos	Cavidades / huecos	Lagunas, antiguas canteras
	Montículos, terraplenes	Disposición no ordenada de materiales o residuos
	Rellenos	Cavidades naturales o antrópicas
Otros usos	Infraestructura vial	Pistas afirmadas, trochas, pistas pavimentadas
	Usos agrícolas	Huertos, praderas, tierras agrícolas
	Superficies acuáticas	Lagos, lagunas, ríos

Fuente: elaboración propia con base en BLfU, 2016.

En cambio, la identificación de las actividades económicas en un sitio puede resultar difícil a partir del análisis de fotografías aéreas. En pocos casos es posible determinar el rubro al que pertenecen los sitios pequeños o las plantas en zonas industriales mezcladas, puesto que están usualmente cubiertas y, por tanto, no son visibles.

En estos casos se clasifica la información de acuerdo con diferentes categorías (tabla 7).

2.2.2. LEVANTAMIENTO TÉCNICO DEL SITIO

Luego de haber realizado la investigación histórica del sitio se tiene un conocimiento general sobre la actividad desarrollada; pero no en todos los casos y por diferentes razones (por ejemplo, falta de registros o testimonios) es posible obtener la información requerida. Una vez agotadas las posibilidades y las fuentes de información, con base en la información recabada se debe realizar un levantamiento técnico del sitio a partir de una visita de campo, la cual no incluye la toma de muestras ambientales ni la realización de entrevistas. El levantamiento técnico del sitio cumple varias funciones: con-

firmar y complementar la información ya recopilada y recabar, en la medida de lo posible, la información faltante.

Inspección del sitio / visita de campo

El objetivo de esta inspección es obtener información precisa que sirva de sustento para:

- ◆ La planificación del MI y, de ser el caso, de la fase posterior de caracterización.
- ◆ La identificación de los usos actuales del sitio y del entorno.
- ◆ La determinación de los receptores humanos, ambientales y ecológicos.
- ◆ La identificación de los usos pasados.
- ◆ La visita de campo en el sitio incluye, entre otros aspectos:
 - ◆ El recorrido del sitio.
 - ◆ El levantamiento topográfico del sitio, así como los límites del predio o los predios existentes en el sitio.
 - ◆ La localización de estructuras y construcciones.
 - ◆ La identificación de todos los componentes,

estructuras, instalaciones y obstáculos físicos que influyen en la localización de los puntos de muestreo.

- ◆ La descripción y la localización de todas las áreas con antecedentes de manejo de sustancias potencialmente contaminantes.
- ◆ La descripción de las características hidrogeológicas del suelo con base en la información documental.
- ◆ La descripción de los depósitos, los apilamientos o los hallazgos de residuos depositados, entre otros aspectos relevantes del sitio.
- ◆ Estudios de georradar en sitios con residuos sólidos enterrados o almacenamiento de sustancias químicas en el subsuelo.

Antes de realizar la inspección del sitio es necesario planificarla, con el objetivo de centrar la atención en los aspectos claves a levantar.

Para cada sitio en particular la información a recoger será diferente y específica dependiendo de la información previa obtenida. Existe un conjunto de preguntas que deben responderse durante la inspección al sitio para ayudar en la etapa de inspección (tabla 8 y anexo 5). En el caso de que no se puedan responder todas las preguntas, resulta fundamental aclarar si ello ocurre por falta de información disponible.

La inspección del sitio debe complementarse con registros fotográficos que acompañen la información levantada.

En la inspección, se puede tomar como indicios o sospechas de contaminación los siguientes hallazgos:

- ◆ Ausencia de vida silvestre (pájaros y mamíferos) y/o de vegetación.
- ◆ Olores extraños.
- ◆ Vegetación estresada o muerta.
- ◆ Coloración o decoloración de suelos y pisos.
- ◆ Impermeabilización deficiente.
- ◆ Suelo retirado del local.
- ◆ Amontonamiento en pilas.

- ◆ Disposición de cilindros desordenados.
- ◆ Constatación de derrames o fugas.

Entrevistas

Son herramientas para buscar información que valide o mejore el conocimiento obtenido a través de la revisión de documentos y de la inspección del sitio. Con frecuencia, son la única forma de obtener información sobre las actividades debido a la ausencia de registros y, por tanto, el único paso sustancial de la EP.

"No utilices la entrevista para la toma de decisiones. Utiliza la entrevista para recopilar la evidencia que se requiere para la toma de decisiones".

Sherlock Holmes

En cualquier caso, la revisión de documentos, las entrevistas y la inspección del sitio forman parte de un proceso interactivo de búsqueda y validación que se retroalimenta a medida que se va obteniendo mayor información.

Los entrevistados deben ser referentes calificados por su relación con el sitio y las actividades, por ejemplo:

- ◆ Personas vinculadas directamente a las actividades desarrolladas en el sitio, en la actualidad o en el pasado: operarios, personal de jerarquía, representantes legales y empresarios, sindicatos, clientes y proveedores.
- ◆ Vecinos, propietarios o habitantes actuales y anteriores del sitio.
- ◆ Historiadores, periodistas y otros referentes con amplios conocimientos de la localidad y su historia.
- ◆ Especialistas y referentes locales en temas ambientales.

Es conveniente establecer previamente las consultas que se van a realizar durante la entrevista, para lo cual se sugieren las preguntas claves presentadas en la tabla 9.

Es necesario dejar registro de todas las entrevistas para su consulta cada vez que sea nece-

TABLA 8. Levantamiento técnico del sitio guía de aspectos y preguntas claves

- ◆ Formule preguntas como las siguientes:
 - ¿Cómo se ingresa al sitio? ¿El acceso está controlado o limitado?
 - ¿Qué actividades se observan en el sitio y su entorno al momento de la inspección? (por ejemplo recreativas, residenciales, agrícolas, comerciales, industriales).
 - ¿Está abandonado?
 - ¿Es un «área de paso» para vecinos?
 - ¿Existe cubierta vegetal del suelo?
 - ¿Cuál es la superficie aproximada del sitio?
 - ¿Existen construcciones en el sitio?
 - ¿En qué condición se encuentran las instalaciones y cuál es su función?
 - ¿Existen evidencias de áreas de disposición final de residuos en el sitio? Ubicar y describir las áreas identificadas.
 - ¿Se observan residuos sólidos en áreas exteriores del sitio o al interior de edificios?
 - ¿Cuenta con equipos transformadores o condensadores eléctricos? (año de fabricación).
 - ¿Existen evidencias de derrames en el sitio? Ubicar y describir las áreas identificadas.
 - ¿Existen tanques de combustible o de otros productos químicos en áreas exteriores o al interior de edificios?
 - ¿Hay personas que habitan en el sitio? Describir esta población: número de familias, distribución por edades, situación socioeconómica, actividades laborales.
 - ¿Se crían animales para consumo humano en el sitio y su entorno? ¿Qué animales?
 - ¿Existen áreas de cultivo para consumo humano en el sitio y su entorno? Ubicar y describir las áreas identificadas.
 - ¿Existen cuerpos de agua próximos o que atraviesen el sitio? (ríos, lagunas, arroyos, cochas, etc.).
 - ¿Cuál es su uso? (recreativo, pesca, consumo humano, etc.).
 - ¿Existen pozos de extracción de agua subterránea en el sitio o su entorno?
 - ¿Se utiliza el agua subterránea para consumo humano, de animales o productivo?
 - ¿Existen áreas recreativas y de reunión de niños (actividades recreativas como parques y clubes deportivos, incluyendo instituciones educativas como guarderías y escuelas, etc.) en el sitio o en el entorno? Ubicar y describir las áreas identificadas.
- ◆ Realice una descripción general de la topografía, la morfología y la vegetación del sitio.
- ◆ Desarrolle un croquis del sitio con los hallazgos principales de la visita.

TABLA 9. Entrevista: posibles preguntas

- ◆ ¿Cuál ha sido su relación con el sitio y las actividades?
- ◆ ¿Qué actividades se desarrollan o han desarrollado en el sitio? ¿Durante qué periodo?
- ◆ ¿Qué personal emplea o empleaba para cada actividad?
- ◆ ¿Conoce en la localidad alguna filial, sucursal o área de operaciones de estas actividades fuera del sitio?
- ◆ ¿Quién es el propietario del sitio?
- ◆ ¿Conoce alguna actividad similar que se desarrolle o se haya desarrollado en la localidad?
- ◆ ¿El sitio ha sufrido modificaciones en su morfología?
- ◆ ¿Qué edificaciones se han construido, cuál ha sido su uso y dónde están ubicadas?
- ◆ ¿Han ocurrido accidentes o eventos notables concernientes a la salud ocupacional (incendios, derrames)?
- ◆ ¿Cuáles eran o son las emisiones a la atmósfera, los efluentes líquidos y los residuos sólidos de las actividades?
- ◆ ¿Cómo han sido o son manejados?
- ◆ ¿Dónde se ubican los puntos de vertido de los efluentes líquidos de cada actividad?
- ◆ ¿Han existido o existen áreas de depósito, tratamiento o disposición final de residuos, por ejemplo rellenos sanitarios, botaderos, etc.?
- ◆ ¿Cómo se conducían o conducen las aguas pluviales?
- ◆ ¿El sitio ha sufrido o sufre inundaciones?
- ◆ ¿Los vecinos del sitio se han visto afectados y han presentado quejas por las actividades?
- ◆ ¿Quién o qué institución podría brindar información adicional?
- ◆ Otras que resulten necesarias.

Elaboración propia.

sario, y para que otros investigadores cuenten con este material. Con este fin es útil tomar notas y, si es posible, usar una grabadora cuando el entrevistado no presente objeciones.

2.2.3. PRESENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de la EP se presentan en el IISC, cuya estructura del contenido se define en el anexo 2 de la presente guía. Si la fase de identificación no incluyese el MI no será necesario elaborar el ítem 4 de ese modelo de contenido.

En el IISC se deben describir y documentar detalladamente los trabajos realizados. Esto incluye que el informe contenga una lista de las informaciones utilizadas y de los documentos revisados. Igualmente, se deben anexar copias de los documentos relevantes, los registros de campo, las fichas de entrevistas, la memoria fotográfica de la visita de campo, las fotografías aéreas o satelitales analizadas, los mapas y los planos que muestren en forma gráfica los resultados de la evaluación, etc. Mayor detalle al respecto se presenta en el anexo 2.

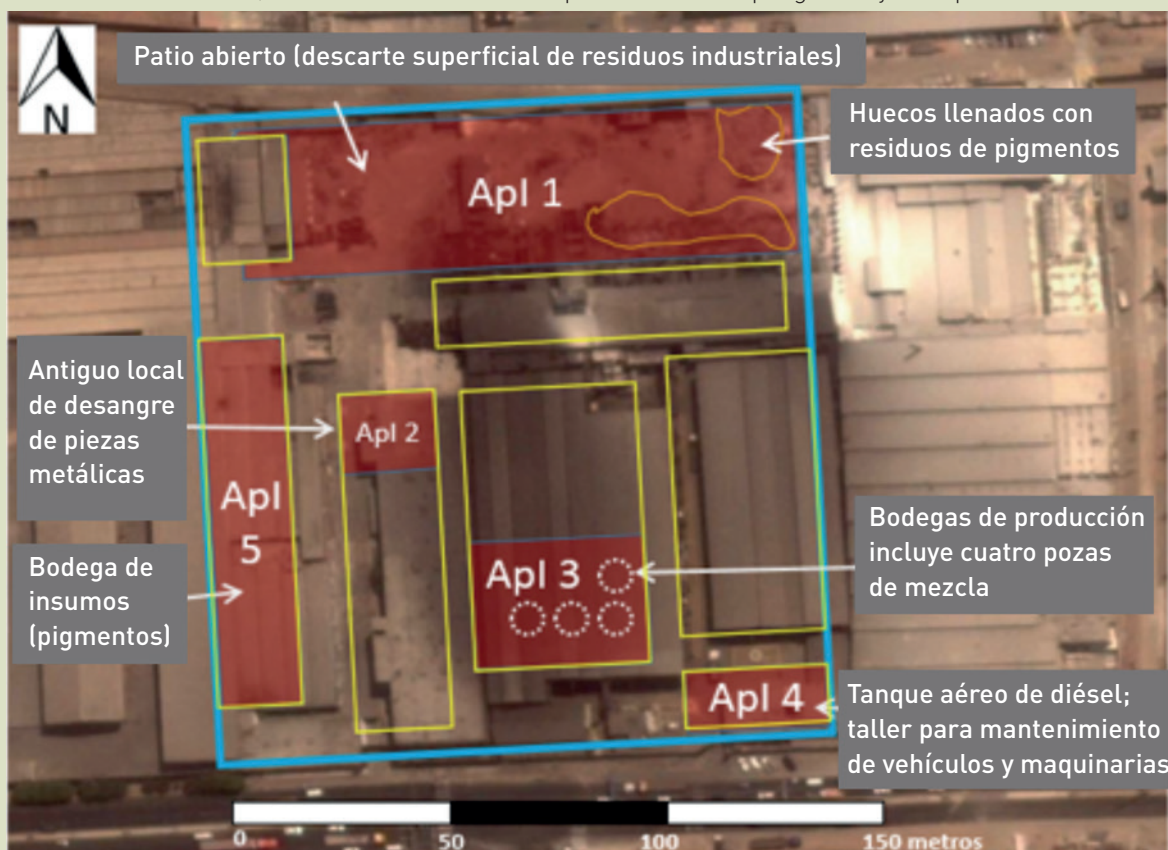
La información obtenida durante la revisión documental, del análisis de las fotografías aéreas,

ILUSTRACIÓN 22. Evaluación preliminar: mapa de un sitio potencialmente contaminado, con indicación de las áreas de potencial interés identificadas, en caso fábrica de pinturas

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN PRELIMINAR: CASO FÁBRICA DE PINTURAS

La ilustración 22 presenta un mapa del sitio potencialmente contaminado, en este caso, del predio de una fábrica de pinturas (rectángulo azul), con las edificaciones existentes (polígonos amarillos) y el señalamiento de las cinco Apl identificadas por la investigación histórica y el levantamiento técnico del sitio.

Complementariamente, la tabla 10 ofrece un resumen de las Apl identificadas, las fuentes potenciales de contaminación, los materiales / residuos potencialmente peligrosos y los Cpl.



Elaboración propia.

las entrevistas y las visitas de campo es evaluada, validada e interpretada con el fin de cumplir con los objetivos de la EP planteados para el sitio bajo estudio (ver 1.6 y 2.2.1).

Esta tarea incluye resumir toda la información que pueda ser relevante para identificar:

- ◆ Los potenciales fuentes y focos de contaminación en el sitio y en su entorno, incluyendo una ponderación de los niveles de evidencia y de la magnitud del potencial de contaminación de fuentes y focos identificados.

- ◆ Las Apl.
- ◆ Los Cpl.
- ◆ Otras fuentes de información para el desarrollo del MCS.

Inmediatamente después, se debe comparar la información de las diferentes fuentes con el propósito de validar los datos obtenidos, considerando también aspectos de plausibilidad e integridad de la información recopilada.

Asimismo, se deben comparar las presentacio-

nes gráficas en planos con las fuentes textuales, considerando que los edificios, la infraestructura y las instalaciones pueden diferir en la realidad de las condiciones que presentan en los planos (sobre todo cuando se trata de planos elaborados en fases iniciales de planificación de la gestión de un sitio contaminado).

La EP siempre incluye un resumen de las condiciones naturales del sitio, en especial las características geológicas, hidrogeológicas e hidrológicas del área de estudio. Esta información es recopilada de fuentes existentes, como estudios hidrogeológicos o mapas geológicos, entre otros.

Los resultados de la EP se presentan en mapas y tablas, como los que se muestran en la ilustración 22 y la tabla 10 que corresponden a un ejemplo de fábrica de pinturas. El anexo 6 de la presente guía contiene *elementos orientadores* para estandarizar el reporte de la información obtenida durante la EP.

Finalmente, se elaboran recomendaciones res-

pecto a los próximos pasos en la evaluación del sitio, en particular sobre la necesidad de continuar con el MI y su alcance, en caso corresponda.

2.3. Muestreo de identificación

El MI se realiza cuando la información obtenida durante la EP determina sospechas o indicios de contaminación en el sitio o si sus resultados no lograron descartar la presencia de contaminación en el sitio. Este último supuesto puede presentarse por no existir información sobre los usos actuales o históricos en el sitio, o si la información fuese incompleta o contradictoria. En ambos casos se aplica un MI para comprobar o descartar con datos analíticos si el sitio bajo estudio se clasifica como contaminado o no.

La elaboración del MI sigue un procedimiento general (ilustración 24). A continuación se presentan los objetivos del MI, su alcance, aspectos

TABLA 10. Evaluación preliminar: resultado en caso fábrica de pinturas

Área de potencial interés	Fuente potencial de contaminación	Materiales / residuos potencialmente peligrosos	Contaminantes de potencial interés
Apl 1: patio	Descarte de residuos industriales (superficiales y enterrados)	Restos de pigmentos o residuos industriales	Metales pesados (plomo, mercurio, cadmio)
Apl 2: local de desengrase (de una actividad pasada)	Desengrase de piezas metálicas con solventes organoclorados	Solventes organoclorados (en este caso, TCE)	TCE, metales pesados (plomo, mercurio y cadmio)
Apl 3: bodega de producción	Mezcla de pigmentos y solventes en pozas	Solventes orgánicos (en este caso, tolueno)	Tolueno, metales pesados (plomo, mercurio y cadmio)
Apl 4: taller	Tanque aéreo de diésel, mantenimiento de vehículos y máquinas	Diésel, aceites, lubricantes	Hidrocarburos, BTEX, metales pesados (plomo, mercurio y cadmio)
Apl 5: bodega de pigmentos	Almacenamiento de pigmentos	Pigmentos tóxicos	Metales pesados (plomo, mercurio y cadmio)

Elaboración propia.

ILUSTRACIÓN 23. Evaluación preliminar: modelo conceptual de sitio con indicación de áreas de potencial interés, fuentes y focos de contaminación, en caso mina

ÁREAS DE POTENCIAL INTERÉS, FUENTES Y FOCOS DE CONTAMINACIÓN: CASO MINA

La ilustración 23 muestra el MCS de una mina y grafica, a manera de ejemplo, la relación entre las fuentes y los focos de contaminación y las Apl.

Generalmente, se entiende como «fuente (primaria) de contaminación» el componente o la instalación (por ejemplo, un depósito de relave que genera drenajes ácidos o un tanque de combustible con fuga), el evento o el proceso (por ejemplo, derrame o accidente) que causa o causó la liberación de contaminantes al ambiente.

La liberación de contaminantes al ambiente puede generar «fuentes secundarias de contaminación», también llamadas «focos de contaminación». Un ejemplo de foco de contaminación son los suelos contaminados por petróleo, ya que estos pueden representar una fuente de contaminación para otros medios ambientales, como el agua subterránea.

En cambio, las Apl de un sitio bajo estudio son aquellas áreas donde existen sospechas, indicios o evidencias de contaminación y, por ello, se con-

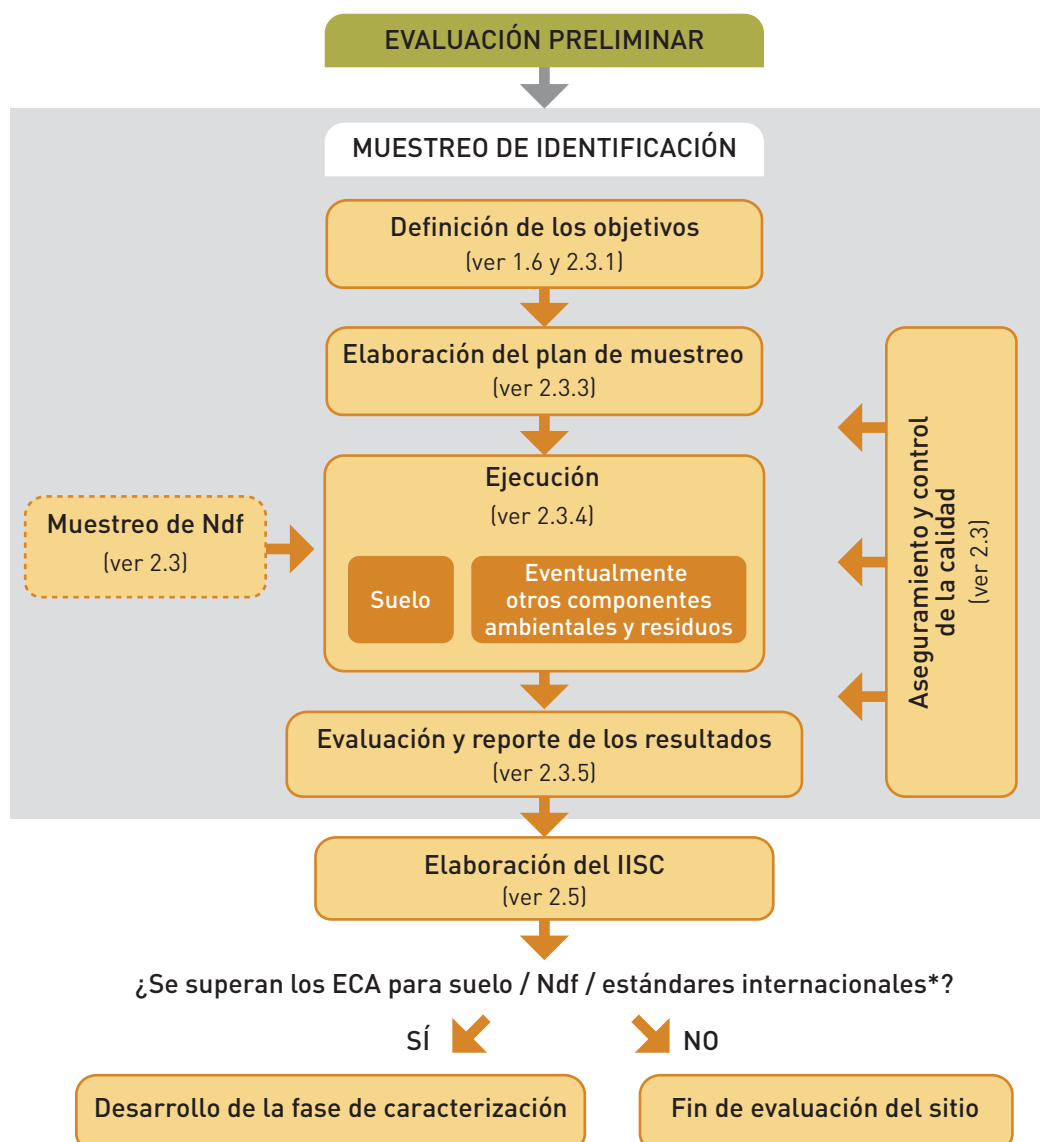
sideran de interés para el desarrollo del MI. Este muestreo tiene por fin comprobar o descartar la presencia de contaminación en las Apl y, en caso esta exista, determinar su magnitud (si supera o no los ECA para suelo, etc.).

La definición y la delimitación de las Apl se realizan con base en la información obtenida durante la EP. Estas áreas deben abarcar todas las zonas donde, hipotéticamente, podría presentarse contaminación, lo que incluye tanto las áreas de potenciales fuentes y focos de contaminación como las áreas de posible transporte / migración de contaminantes.

Pueden definirse como Apl las áreas sobre las cuales no existe información registrada respecto a sus usos anteriores y, por tanto, no se puede descartar la presencia de contaminación en estas zonas. Si existiese una sospecha de contaminación por falta de información, este supuesto puede servir de sustento para incluir estas áreas en el MI.



ILUSTRACIÓN 24. Muestreo de identificación en sitios potencialmente contaminados: procedimiento en flujograma



* Para parámetros no regulados, previa aprobación por el MINAM; o en su defecto, en aplicación de la Ley General del Ambiente. Elaboración propia.

de la planificación y la ejecución de los trabajos de campo e indicaciones sobre la evaluación y el reporte de los resultados.

2.3.1. OBJETIVOS

En esta etapa se verifica o descarta la presencia de un sitio contaminado mediante la toma de muestras del suelo y el análisis de los parámetros relacionados con aquellas sustancias químicas, materiales o residuos peligrosos vinculados a las actividades potencialmente con-

taminantes para el suelo que se hayan realizado o realicen en el sitio.

Los resultados obtenidos deben compararse con los ECA para suelo o con los NdF, siempre que estos últimos presenten valores que excedan dichos ECA. De acuerdo con la norma vigente³⁶, en el caso de sustancias no reguladas en los ECA para suelo se podrán aplicar de manera referencial estándares establecidos por instituciones de derecho internacional público.

El tipo y el alcance del MI dependen del MCS

36. Ley N° 28611, Ley General del Ambiente.

preliminar de cada sitio desarrollado en la EP. Se efectúa en las Apl identificadas en la EP y, en caso corresponda, puede incluir el muestreo de la fase gaseosa del suelo, residuos, sedimentos, polvos sedimentables, aguas subterráneas o aguas superficiales, con el fin de identificar las fuentes de contaminación y las posibles afectaciones de otros componentes ambientales.

El MI se desarrolla de acuerdo con lo que establece la guía para el muestreo de suelos³⁷ (MINAM, 2014). El diseño de este muestreo proporciona información para identificar el número total de muestras necesarias a coleccionar en un área bajo condiciones específicas (distancia de la fuente de contaminación, localización geográfica, condiciones climáticas, entre otros) para caracterizar de forma preliminar la dispersión de la contaminación.

En la elaboración del diseño de muestreo, la eficiencia del uso de tiempo, de dinero y de recursos humanos son factores con frecuencia determinantes para garantizar su debido alcance.

Anteriormente (ver 1.8) ya se ha revisado ejemplos del alcance del MI para los cinco principales tipos de contaminación en sitios contaminados. Estos ejemplos son de carácter orientador y tienen la finalidad de evidenciar los principios de las estrategias del muestreo en diferentes escenarios de contaminación.

ALCANCE DE MUESTREO

Aquellas sustancias identificadas en los procesos principales, secundarios o auxiliares del sitio en estudio, actuales e históricos, que no cuentan con ECA para suelo y que se consideran sustancias contaminantes también son analizadas como parte del MI.

2.3.2. ALCANCE MÍNIMO Y CRITERIOS CONCEPTUALES

Para realizar el MI se establecen criterios que garanticen la representatividad del muestreo del suelo y, eventualmente, de otros componentes ambientales potencialmente afectados. Esto significa que el muestreo se identifica aquellos procesos de contaminación relevantes con potencial de riesgo para la salud humana y la calidad del ambiente con respecto a los escenarios de usos actuales y/o propuestos; no aquellas anomalías falsas, no sistemáticas, puntuales y sin potencial de riesgo. Es la tarea más exigente y compleja en esta fase de gestión de un sitio contaminado (MINAM, 2014: 1.3.1).

Además, el MI debe ser eficiente y corresponder al problema en términos de alcance, número de puntos de muestreo, parámetros, inversión de tiempo y de recursos.

Los ECA para suelo son el nivel de concentración de un parámetro químico / sustancia en el suelo a partir del cual existe un «riesgo potencial» para la salud y para el ambiente. Se trata de valores genéricos, es decir, no son específicos para las condiciones particulares del sitio bajo estudio.

Son valores que distinguen entre tres diferentes escenarios de uso de suelo: agrícola, residencial / parques, y comercial / industrial / extractivo.

El carácter genérico de los ECA se manifiesta en que sus valores no son específicos para las profundidades de detección (muestreo) ni para las diferentes rutas y vías de exposición. Constituyen valores aplicables para todas las profundidades del suelo y para cualquier escenario de exposición, es decir, abarcan las distintas vías de exposición (contacto directo, ingestión, inhalación de material particulado, cadena alimenticia) y los diferentes receptores (adultos, niños, trabajadores, plantas, animales, etc.).

La presente guía (ver 1.8) contiene orientaciones sobre la estrategia del MI para los cinco tipos de contaminación más comunes en sitios

37. Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM

contaminados. Con base en modelos conceptuales estandarizados se presentan las configuraciones básicas y el alcance mínimo para un muestreo representativo del suelo, de la fase gaseosa del suelo y de aguas subterráneas.

De acuerdo con esas orientaciones, el muestreo de suelo superficial se hace necesario cuando la EP indica que existe posibilidad de contaminación en la capa superior del suelo generada por fuentes y causas de contaminación como disposición superficial de residuos, derrames superficiales de sólidos o líquidos, aportes por emisiones atmosféricas, etc. Esta situación se presenta en el tipo 1 (ver 1.8.2).

El muestreo de suelos profundos se requiere para identificar contaminación causada por residuos enterrados, derrames de líquidos con potencial de migración vertical (por ejemplo, combustibles, solventes organoclorados), fuentes de liberación subterránea (por ejemplo, tanques subterráneos), siempre basándose en sospechas, indicios o evidencias presentadas como resultado de la EP y su respectivo MCS. Esta situación se presenta en el tipo 2 (ver 1.8.3).

El muestreo de la fase gaseosa del suelo puede formar parte del MI si se presume contaminación con gases o sustancias volátiles, con el fin de identificar fuentes de contaminación y para corroborar potenciales riesgos de exposición por inhalación de sustancias tóxicas o riesgos de explosión.

Se recomienda la toma de muestras de aguas subterráneas de pozos existentes en el marco de la fase de identificación para establecer potenciales fuentes de contaminación y evaluar una posible afectación de este medio. Esta información es de importancia para una adecuada planificación del MD en la fase de caracterización. Al respecto, considerar lo señalado para los tipos 3 a 5 (ver 1.8.4, 1.8.5 y 1.8.6).

2.3.3. PLAN DE MUESTREO

Antes de realizar el MI se debe elaborar un plan

de muestreo, de acuerdo con lo indicado en la guía para el muestreo de suelos³⁸ (MINAM, 2014). En ese plan se deben definir claramente los objetivos que permitan un óptimo proceso de levantamiento de la información necesaria para la descripción del sitio mediante el establecimiento de:

- ◆ Objetivos del muestreo.
- ◆ Área en la que se focalizarán los esfuerzos de muestreo (Apl).
- ◆ Tipos y técnicas de muestreo.
- ◆ Determinación del número y la posición de puntos de muestreo.
- ◆ Procedimientos logísticos de campo (accesos, gestión de residuos, etc.).
- ◆ Métodos de conservación y transporte de muestras.
- ◆ Necesidades analíticas a desarrollar.
- ◆ Medidas para el control y el aseguramiento de la calidad (ver 1.4).
- ◆ Aspectos de salud, seguridad y ambiente (HSE, por su sigla en inglés) a considerar en el desarrollo de los trabajos de campo.

Mayor información sobre el desarrollo del plan de muestreo de identificación se puede encontrar en la guía para el muestreo de suelos (MINAM, 2014)³⁹.

2.3.4. EJECUCIÓN

El MI se ejecuta de acuerdo con las actividades planteadas en el respectivo plan de muestreo. En este contexto, puede ser necesario el desarrollo de talleres o charlas con las autoridades y la población involucrada para informar sobre los trabajos previstos y coordinar asuntos logísticos y de seguridad comunitaria (ver también lo señalado en 1.3 y en el capítulo 5).

Debe tenerse en cuenta que durante los trabajos de campo pueden presentarse imprevistos y hallazgos que hacen necesario adaptar el muestreo

38. Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM

39. Se recomienda consultar, complementariamente, literatura internacional al respecto como la guía canadiense (CCME, 2016a) o la norma mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006 (Estados Unidos Mexicanos, 2006).

a las condiciones del sitio.

Se puede necesitar una modificación del plan de muestreo, por ejemplo, si se identificasen durante los trabajos de campo fuentes de contaminación que no se habían considerado a partir de los resultados obtenidos durante la EP. En este caso puede requerirse una ampliación del alcance del muestreo en función de los nuevos hallazgos. Durante el muestreo también puede encontrarse contaminación u otras condiciones de riesgo no previstas (por ejemplo, inestabilidad física del suelo o de las edificaciones) que demanden una adaptación del muestreo y de las medidas de seguridad y salud ocupacional.

La finalidad de la toma de muestras es siempre cumplir con los objetivos del muestreo (por ejemplo, comprobar o destacar la presencia de un sitio contaminado). En este sentido, una adaptación de las actividades de muestreo a las condiciones reales del sitio resulta pertinente, siempre y cuando este técnicamente sustentada.

2.3.5. PRESENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante el MI, tanto de campo como analíticos, son evaluados y reportarse en el IISC (ver 2.6).

Evaluación de los datos

La evaluación de los datos involucra, entre otros aspectos, su validación de acuerdo con los objetivos y con los indicadores de calidad de datos establecidos previamente en el PACal (ver 1.4).

Es importante que se evalúen e interpreten los datos del muestreo en combinación con los resultados de la EP, con el fin de corroborar la información, identificar datos faltantes y determinar la plausibilidad de los hallazgos y de la información obtenida.

Los nuevos conocimientos del MI [muestreo de identificación] se utilizan para retroalimentar el MCS [modelo conceptual del sitio] y así convertir el preliminar en inicial. Para ello se toma como base el MCS preliminar que se elaboró en el marco de la EP y se contrastan sus hipótesis

con los datos y la información obtenida por el muestreo.

En este contexto, una tarea principal es validar si las fuentes potenciales de contaminación y las potenciales rutas de migración de los contaminantes identificadas en la EP existen o no. Además, puede ocurrir que la información obtenida no sea suficientemente concluyente para comprobar o descartar la existencia de estos. En ese caso, puede ser necesario complementar información en el marco de la fase de caracterización.

Presentación de resultados

Los resultados del MI, tanto de campo como de laboratorio, son documentados al detalle en el IISC, lo que implica anexar al informe las bitácoras de campo, las fichas de muestreo, los perfiles geológicos de las perforaciones y los informes de ensayos analíticos, entre otros (ver anexo 2).

Además, se presentan y grafican los resultados obtenidos en tablas, mapas y perfiles de suelos. El alcance y los tipos de ilustraciones estarán en función de la complejidad del estudio y deben apoyar la comprensión de los hallazgos del MI.

Las ilustraciones o los mapas siempre deben contar con elementos gráficos que permitan la orientación geográfica en el sitio (edificaciones, calles, carreteras, ríos, instalaciones / componentes industriales como tanques, etc.), escala, flecha de norte y leyenda.

Es recomendable no sobrecargar los mapas con información, pues no es necesario mostrar en un mapa los resultados analíticos de todos los contaminantes analizados, sino que solo se debe seleccionar aquella información que permita una adecuada interpretación de los hallazgos relevantes.

A modo de ejemplo de cómo se pueden graficar los resultados del MI, sobre la base del caso fábrica de pinturas que se presentó con anterioridad (ver 2.2.4), se incluyen tres mapas: uno de resultados, otro de detalle y un tercero de perfil del subsuelo.

El mapa de resultados (ilustración 25) señala la ubicación de los puntos considerados y el tipo de muestreo de suelo realizado, así como la evaluación de los resultados analíticos. En ese mapa, los símbolos de los puntos corresponden a diferentes tipos de muestras de suelo: muestra superficial compuesta, triángulo con punta hacia arriba; muestra superficial simple, triángulo con punta hacia abajo; muestra a profundidad / perforación / sondeo, círculo. En el caso de las muestras compuestas se indican además con polígonos las áreas en las cuales se tomaron las submuestras.

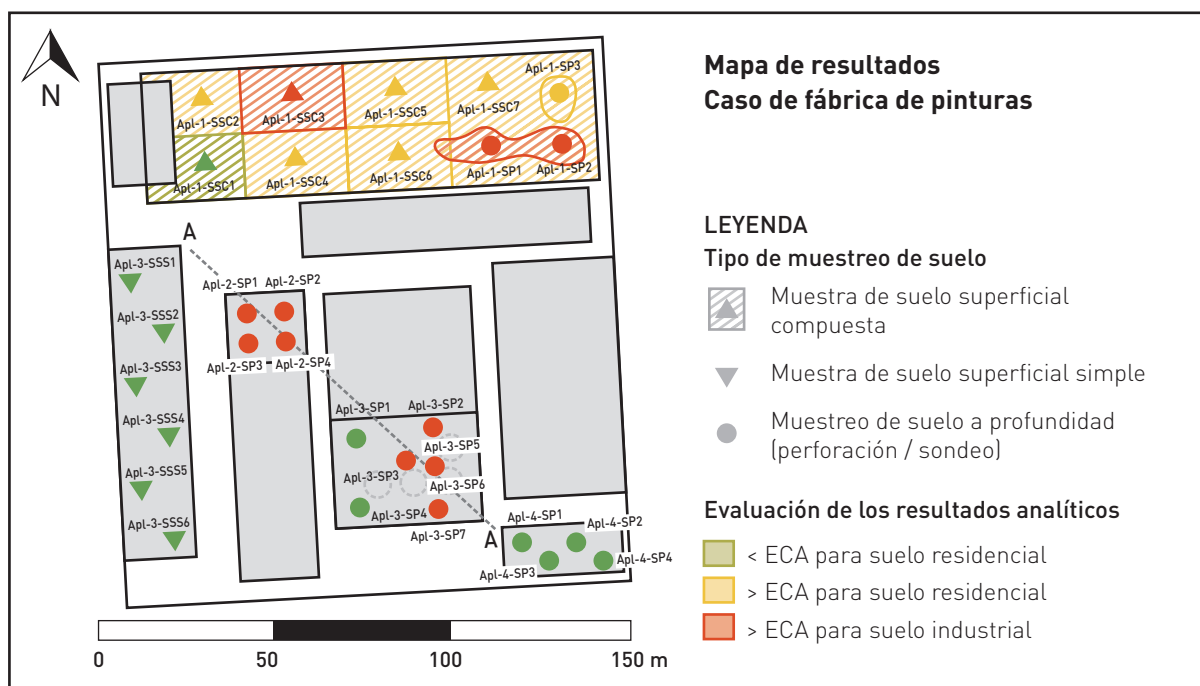
Este mapa también señala los puntos de muestreo que superan los ECA para suelo. En este caso, se aplicaron los ECA para suelo de uso industrial (= uso actual) y uso residencial (= uso potencial o futuro), utilizando una escala de tres colores: verde (< ECA residencial), anaranjado (> ECA residencial) y rojo (> ECA industrial). Determinante para la asignación del color es la superación máxima de cualquier contaminante, es decir, si un contaminante (por ejemplo, plomo) supera el límite industrial se asigna al símbolo el color rojo, a pesar de que otros con-

taminantes (por ejemplo, mercurio y cadmio) superen solamente el límite residencial. En el caso de las muestras a profundidad se toma usualmente más de una en un punto de muestreo. Decisiva para la asignación del color es en este caso la muestra «más contaminada» por punto de muestreo.

La ilustración de los resultados del MI es necesariamente resumida. Para incluir mayores detalles es recomendable la elaboración de mapas detallados. El grado de detalle y la información que contienen estos mapas dependerán de las particularidades de cada caso. Es muy útil que los mapas señalen la información que tiene relevancia para la interpretación de los hallazgos, sin ocultar datos fundamentales. La presentación gráfica siempre debe ser lo más sencilla posible, y lo más compleja que sea necesario.

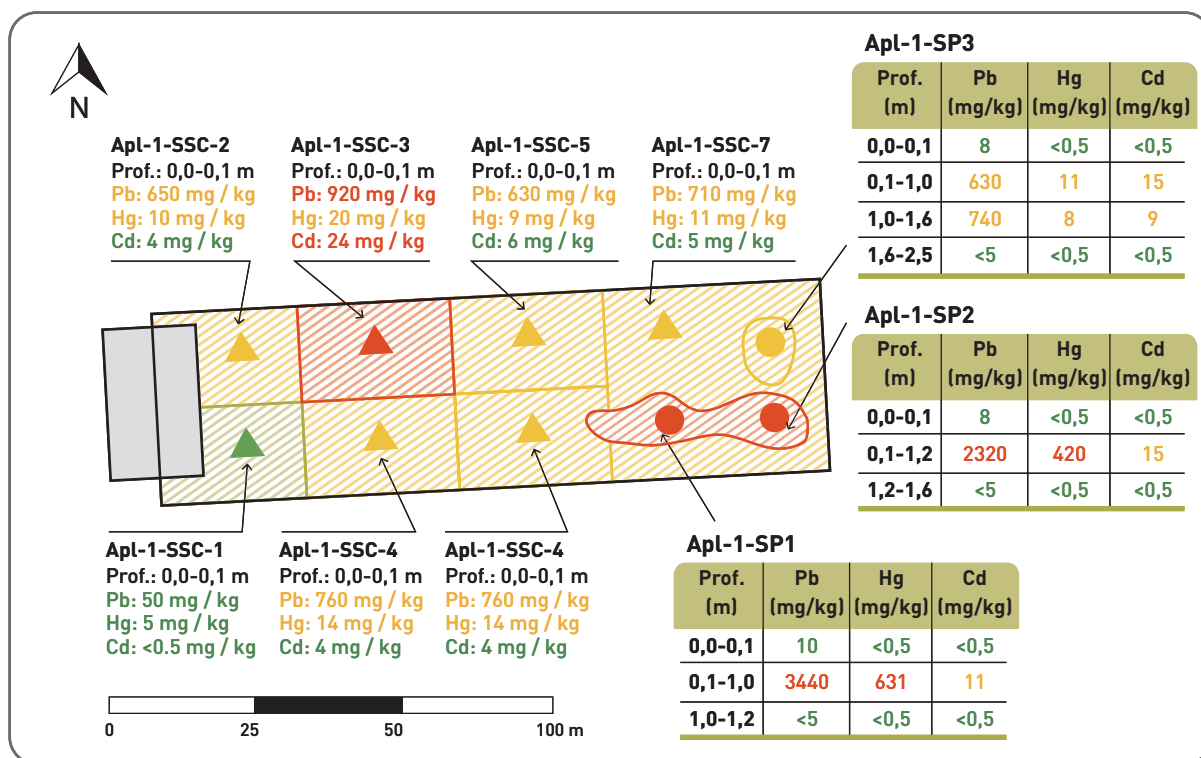
El mapa de detalle corresponde al patio (Apl 1) de la fábrica de pinturas (ilustración 26). En él se pueden apreciar más detalles, como la profundidad de las muestras y los resultados analíticos para plomo, mercurio y cadmio, los cuales son, en este caso, de acuerdo con los

ILUSTRACIÓN 25. Muestreo de identificación: mapa de resultados, caso fábrica de pinturas



Elaboración propia.

ILUSTRACIÓN 26. Muestreo de identificación: mapa de detalle con indicación de los contaminantes de potencial interés (metales), caso fábrica de pinturas



Elaboración propia.

resultados de la EP, los Cpl.

El mapa del perfil del subsuelo (ilustración 27) de la fábrica de pinturas muestra el corte vertical en el tramo comprendido entre los puntos A y A' del análisis multitemporal de las fotografías aéreas (ilustración 21). En general, cuando el MI incluye la realización de zanjas, perforaciones o sondeos para tomar muestras de suelos a profundidad se recomienda ilustrar los resultados en perfiles del subsuelo.

Los perfiles del subsuelo incluyen los siguientes elementos:

- ◆ Puntos cardinales
- ◆ Escala horizontal y vertical
- ◆ Elementos geográficos de orientación (edificaciones, Apl, etc.)
- ◆ Fuentes potenciales de contaminación (por ejemplo, tanques)
- ◆ Tipos de superficie (pavimento, suelo expuesto, césped, losa de concreto, etc.)
- ◆ Estratos geológicos del subsuelo

- ◆ Profundidad de la napa freática
- ◆ Ubicación y profundidad de perforaciones / sondeos / zanjas, etc.
- ◆ Ubicación de las muestras a profundidad
- ◆ Resultados analíticos (relevantes) de los Cpl
- ◆ Eventualmente, hallazgos organolépticos (por ejemplo, hidrocarburos en fase libre)
- ◆ Otras informaciones para mejor interpretación de los datos

Graficar la ubicación del perfil en un mapa resulta muy útil y complementario con los otros mapas elaborados en el muestreo.

2.4. Muestreo del nivel de fondo

En el marco de la evaluación de un sitio potencialmente contaminado, o un sitio contaminado, se puede incluir el muestreo del NdF con el fin de determinar la concentración natural de los Cpl en la zona de estudio, o para establecer

- El sitio, al mismo tiempo, se encuentra en una zona mineralizada, o en un área donde no se puede descartar la presencia de alteraciones naturales de metales o metaloides en los suelos.
- Es posible que existan fuentes potenciales de contaminación antrópica en el entorno del sitio bajo estudio, con iguales Cpl que los del sitio (por ejemplo, estación de servicio al lado de un almacén de combustibles; ambos lugares tienen como Cpl los BTEX e hidrocarburos de petróleo). En este caso se realiza el muestreo de NdF para descartar que la contaminación del sitio haya sido generada por una fuente no relacionada con este.

◆ Sitios de proyectos nuevos donde:

- Las actividades previstas usarán, manejarán, producirán, emitirán o dispondrán sustancias, materiales o residuos que contienen metales pesados o metaloides, por ejemplo, plomo, arsénico, cromo, mercurio, bario.
- El sitio se encuentra en una zona mineralizada o en un área en la que no se puede descartar la presencia de alteraciones naturales de metales o metaloides en los suelos.
- Es posible que existan fuentes antrópicas en el entorno del sitio bajo estudio que podrían haber generado contaminación con las sustancias contaminantes que usará, manejará, producirá, emitirá o dispondrá la actividad del proyecto nuevo.

En cambio, *no se considera necesario* determinar los NdF en los casos siguientes.

◆ Sitios de actividades en curso, cierre de operaciones y pasivos ambientales donde:

- Los Cpl son sustancias que no se encuentran de forma natural en los suelos, por ejemplo, solventes organoclorados, BTEX, hidrocarburos de petróleo⁴⁰, PCB, cianuro, etc.
- No existen fuentes antrópicas en el entorno del sitio bajo estudio que puedan haber generado contaminación con iguales Cpl que los del sitio bajo estudio.

◆ Sitios de proyectos nuevos donde:

- Las actividades previstas usarán, manejarán, producirán, emitirán o dispondrán sustancias, materiales o residuos que contienen contaminantes que no se encuentran de forma natural en los suelos, por ejemplo, solventes organoclorados, BTEX, hidrocarburos de petróleo⁴¹, PCB, cianuro, etc.
- Al mismo tiempo, no existen fuentes antrópicas en el entorno del sitio bajo estudio que puedan haber generado contaminación con estas sustancias.

En el caso de proyectos nuevos, la determinación de los NdF se realizan en las áreas adyacentes a los lugares donde se instalarán componentes o se desarrollarán procesos de actividades antrópicas potencialmente contaminantes para el suelo (= *áreas de potencial afectación*). En ese sentido, los NdF constituyen la línea base del proyecto respecto a la presencia de contaminantes en el suelo antes del inicio de operaciones.

Para la determinación de los NdF en el marco de la fase de identificación en sitios de actividades en curso, cierre de operaciones o pasivos ambientales se deben seguir las indicaciones de la guía para el muestreo de suelos⁴² (MINAM, 2014)⁴³.

40. Existen afloramientos geogénicos de petróleo que pueden generar una alteración natural de hidrocarburos en los suelos, pero este fenómeno es muy raro y localmente limitado a muy pocos lugares del país (por ejemplo, en Puno o en Talara).

41. Ib.

42. Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM

43. Para mayor detalle sobre este tema se recomienda aplicar la guía estadounidense US EPA, 2002b.

2.5. Criterios para determinar la necesidad de continuar con la fase de caracterización

De acuerdo con la normativa vigente⁴⁴: «... se ejecuta la fase de caracterización cuando los resultados de la fase de identificación determinan la existencia de un sitio contaminado». Por ende, esta condición se define cuando se determina en los suelos concentraciones de contaminantes que superan los ECA para suelo, los NdF o los estándares internacionales para parámetros no regulados.

Esto significa que se comparan las *concentraciones máximas encontradas* (CME) de cada parámetro con los estándares correspondientes (ECA, NdF o estándares internacionales) y, si los CME superan estos valores referenciales, se deberá continuar con la fase de caracterización.

Sin embargo, en la práctica pueden surgir preguntas adicionales en este contexto, como:

- ◆ ¿Es necesario continuar con la fase de caracterización si la superación del valor referencial ocurrió solamente en una muestra o por pocos microgramos?
- ◆ ¿En qué momento se debe realizar la fase de caracterización?
- ◆ ¿Existen otros criterios cuantitativos y cualitativos para determinar la necesidad de continuar con la fase de caracterización aparte de la superación de los ECA, los NdF o los estándares internacionales?

En el caso de sitios contaminados de actividades en curso, la ejecución de la fase de caracterización y de las medidas de remediación podría interferir negativamente con las operaciones y ser, en algunos casos, inviable mientras las operaciones continúen. En estas situaciones es importante evaluar, con base en el riesgo potencial que presenta la contaminación identificada, la posibilidad de desarrollar la fase de

caracterización y las medidas de remediación en el marco del cierre (total o parcial) de la actividad.

A continuación se presentan lineamientos para las acciones que se ejecutan en relación con los diferentes escenarios que pueden resultar de la fase de identificación.

La interpretación de los datos obtenidos en el marco de la fase de identificación y la toma de decisiones sobre las acciones subsecuentes requieren de conocimientos técnicos y calificaciones específicas sobre el tema.

Resulta importante que la toma de decisiones sea conducida por los riesgos que puede representar el sitio contaminado para las personas o para el ambiente. Se debe aclarar que en este contexto no se trata de realización de un estudio de ERSa, el cual involucra el análisis detallado y la cuantificación de los riesgos con metodologías científicas. Para realizar este tipo de estudio se requiere de datos detallados sobre el sitio contaminado con los cuales no se cuenta usualmente al final de la fase de identificación. Sin embargo, al terminarla es necesario establecer escenarios de riesgo potencial a través de una estimación del riesgo, para lo cual se distinguen entre tres escenarios:

- ◆ A: riesgo inmediato agudo
- ◆ B: riesgo potencial indefinido
- ◆ C: bajo riesgo o bajo grado de evidencia

En función de esta clasificación, las acciones necesarias para caracterizar el sitio y controlar los riesgos identificados deben tomarse: de inmediato, en el corto plazo o en el largo plazo.

La fase de identificación puede encontrar las tres situaciones. La A, *riesgo inmediato agudo* de contaminación, exige una intervención inmediata o en el corto plazo; situación poco frecuente. En la B, los resultados de la fase de identificación pueden ser no concluyentes, lo que no permite determinar el grado del riesgo potencial que implica la contaminación del sitio

44. Numeral 7.1 del artículo 7 de los Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados, aprobados por el Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM.

para las personas o para el ambiente. En este caso, se le asignaría al sitio un *riesgo potencial indefinido* y se continua con el desarrollo de la fase de caracterización para complementar la información sobre la contaminación en el sitio y determinar la necesidad de realizar acciones de remediación y su urgencia en función del grado de riesgo y afectación que genera el sitio. En la C, *bajo potencial de riesgo o bajo grado de evidencia* de contaminación, es aceptable no continuar con la caracterización del sitio.

Esta determinación del riesgo potencial tiene implicaciones importantes para decidir en qué momento se desarrolla la fase de caracterización y, en consecuencia, influye sobre el momento en el cual se aplican acciones correctivas o medidas de remediación (por ejemplo, durante la operación de la actividad o en el marco del cierre o el abandono de operaciones).

El procedimiento para determinar la necesidad de continuar con la fase de caracterización se puede apreciar de forma simplificada en la ilustración 28.

A continuación se definen criterios técnicos para clasificar los sitios contaminados de acuerdo con su escenario de riesgo potencial para facilitar la toma de decisiones en función de reglas claras y trazables. Además, estos criterios aportan a una gestión eficiente de los sitios contaminados, puesto que permiten canalizar los recursos y los esfuerzos de todos los actores involucrados de forma prioritaria a los sitios que realmente requieren una intervención por el riesgo potencial que representan para las personas o para el ambiente.

Escenarios de contaminación A: riesgo inmediato agudo

Cuando se encuentren, con base en evidencia visual y organoléptica, cualquiera de las dos siguientes situaciones existe un *riesgo inmediato agudo* en el sitio, con independencia de si se cuenta con resultados analíticos que comprueben

la superación de valores referenciales en el suelo:

- ◆ A.1: existencia de fase libre de hidrocarburos o de otros líquidos peligrosos de un espesor mayor a un centímetro sobre la napa freática, o
- ◆ A.2: existencia de un residuo peligroso (respel) identificado como tóxico, reactivo o explosivo en el suelo o en el subsuelo en cantidades mayores a un metro cúbico (1 m³), y en situación no controlado o confinado, con potencial de exposición.

En estos casos deberían realizarse de forma inmediata o en el corto plazo:

- ◆ A-I: acciones de emergencia con el fin de eliminar los materiales o los respel en el sitio, o medidas de control, si la eliminación de estos no puede realizarse en el corto plazo.
- ◆ A-II: además de las medidas de emergencia se debe realizar la caracterización del sitio, la cual puede incluir una evaluación de la contaminación remanente en el suelo debajo de los residuos eliminados, o la caracterización de la contaminación en la fase disuelta del agua subterránea.

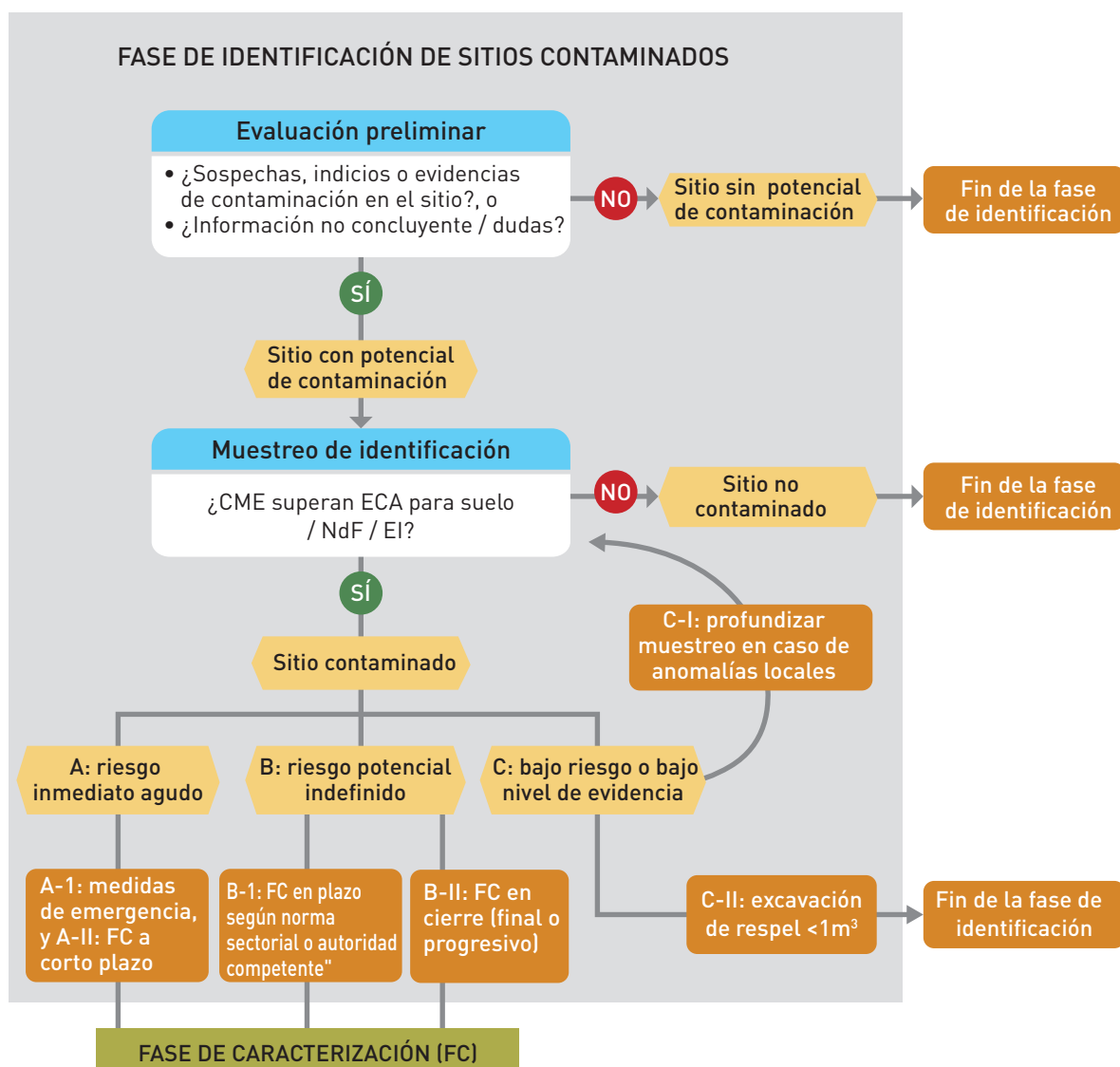
Escenarios de contaminación B: riesgo potencial indefinido

Se constituye un riesgo potencial indefinido en los siguientes casos:

- ◆ B.1: se confirman anomalías locales (5-10 % de los puntos de muestreo con CME > de ECA, NdF o estándares internacionales), o existe una relación comprobada con una fuente de contaminación identificada en la EP (alto nivel de evidencia), o estos puntos están relacionados espacialmente.
- ◆ B.2: se confirma una contaminación superficial a través de un muestreo compuesto, y en más de una parcela⁴⁵ se superan los ECA, NdF o estándares internacionales.

45. Área representada por una muestra compuesta.

ILUSTRACIÓN 28. Criterios para determinar la necesidad de continuar con la fase de caracterización: procedimiento como flujograma



Elaboración propia.

- ◆ B.3: existe la posibilidad de que las fuentes y los focos de contaminación identificados puedan afectar el agua subterránea.
- ◆ B.4: es posible que la contaminación del sitio afecte al entorno del emplazamiento por propagación de contaminantes por vía aérea o intrusión de gases tóxicos y/o explosivos.
- ◆ Si alguno de estos escenarios se confirmase, las opciones resultantes serían las siguientes:
- ◆ B-I: por defecto, se debe realizar la fase de caracterización en los plazos que establece la normativa sectorial vigente o que determine la autoridad competente, si no existie-

se normativa sectorial al respecto.

- ◆ B-II: en los siguientes casos se puede optar por la realización de la fase de caracterización en el marco del cierre de operaciones (progresivo o final).
 - Si los riesgos potenciales identificados se limitasen al emplazamiento de la actividad y se pudiesen controlar con medidas sencillas de carácter operacional o de gestión (por ejemplo, restricciones de accesos, protección ocupacional). Al contrario, si la contaminación en el sitio puede afectar al entorno del emplaza-

miento (por ejemplo, por migración de contaminantes a través del agua subterránea, la fase gaseosa del suelo o el aire), o cuando las medidas de control no fuesen aceptables para los trabajadores o las personas que circulan en el sitio (por ejemplo, uso de equipo y ropa de protección) se debe proceder con la caracterización del sitio, o

- La contaminación es limitada a un área del emplazamiento que no se utiliza ni ocupa la actividad en curso, y no es accesible para externos (clientes, población, etc.).

Escenarios de contaminación C: bajo riesgo potencial o bajo nivel de evidencia

Se está frente a un escenario de este tipo cuando:

- ◆ C.1: se confirman anomalías locales (= máximo 5-10 % de los puntos de muestreo con CME > de ECA, NdF o estándares internacionales), los puntos que superan los valores referenciales no están relacionados entre sí espacialmente y no hay relación con fuentes potenciales identificadas en la EP.
- ◆ C.2: la CME que supera los ECA, NdF o estándares internacionales se limita a una contaminación con un volumen delimitable por la evidencia visual menor a un metro cúbico (1 m³), es superficial (residuos descartados, barriles) o enterrado superficialmente, sin contacto con el acuífero y manejable como residuo (se puede eliminar con excavación).

Cuando se confirma uno de estos criterios se puede optar por las siguientes acciones que son factibles desarrollar en el marco de la fase de identificación sin necesidad de llegar a la fase de caracterización:

- ◆ C-I: a pesar de que se confirma una superación de los ECA, NdF o estándares internacionales, el responsable de la evaluación del sitio tiene la opción de profundizar el muestreo de la fase de identificación, sin tener que ejecutar la fase de caracterización en su totalidad. Esta evaluación adicional

puede consistir en una densificación de los puntos de muestreo en el entorno de las anomalías identificadas. Si estas investigaciones adicionales comprobasen una contaminación de bajo riesgo o nivel de evidencia (es decir, una contaminación que cumple con los requisitos del escenario A.1, no será necesario el desarrollo de la fase de caracterización; en caso contrario, se requerirá su realización de acuerdo con lo indicado en el capítulo 3 de la presente guía.

- ◆ C-II: cuando es posible identificar pequeños descartes de residuos encima o cerca de la superficie puede realizarse la excavación de estos residuos (< 1 m³) sin aprobación específica ni posterior muestreo comprobatorio del fondo o de las paredes de la zanja, siempre y cuando no haya evidencias visuales u organolépticas de contaminación residual. En estos casos se debe incluir en el informe de la fase de identificación la constatación de la excavación de los pequeños volúmenes de residuos peligrosos o suelos contaminados, junto a evidencias documentales como fotografías representativas que demuestren la ausencia de contaminación residual en las zanjas. Se debe señalar que para la gestión de los materiales excavados es necesario cumplir con la normativa vigente sobre manejo y disposición de residuos peligrosos.

Todas las acciones mencionadas en los párrafos anteriores se realizan en el marco de la fase de identificación. Cuando las acciones complementarias comprueban el bajo grado de riesgo de contaminación en el sitio, la fase de identificación se considera «cumplida sin necesidad de acciones subsecuentes».

2.6. Informe de identificación de sitios contaminados

Los resultados de la fase de identificación se sistematizan en el IISC. En el anexo 2 se presenta la estructura general de este informe, la

cual puede adaptarse de acuerdo con las evaluaciones realizadas en cada caso.

El IISC consigna los resultados de la EP y del MI, este último solo si se hubiese realizado; en caso contrario, el informe debe contener el sustento técnico de por qué se consideró pertinente prescindir del MI, el cual debe basarse en datos validados y debidamente concluyentes, con el fin de descartar la presencia de contaminación en el sitio.

Cuando los resultados del MI indican que se trata de un sitio contaminado, el informe debe complementarse con una propuesta de actividades para la ejecución de la fase de caracterización, la que puede incluir el desarrollo de una ERSA.

En todos los casos, el informe debe concluir

con recomendaciones respecto a cómo se debe proceder con la evaluación del sitio. También debe contener propuestas conceptuales de medidas de emergencia si los resultados de la fase de identificación indicasen riesgos inmediatos agudos para las personas o para el ambiente. En este caso, se deben iniciar directamente las coordinaciones respectivas con las autoridades competentes.

El IISC debe presentarse a la autoridad competente para su respectiva aprobación. La presentación del informe debe realizarse según los procedimientos administrativos que establezca dicha autoridad.

Con este paso puede darse por concluida la fase de identificación.



Fase de caracterización de sitios contaminados

(3)

En el presente capítulo se revisan a los objetivos y el alcance de la fase de caracterización, el muestreo de detalle, la evaluación de los riesgos para la salud y para el ambiente, la necesidad de remediar el sitio contaminado y el estudio de caracterización de este.

3.1. Objetivos y alcance

Esta fase se ejecuta cuando los resultados de la fase de identificación determinan la existencia de un sitio contaminado, y tiene como objetivo definir:

- ◆ Las fuentes y los focos de contaminación.
- ◆ La magnitud, el tipo, la extensión y la profundidad de la contaminación del suelo y de los otros componentes ambientales afectados.
- ◆ Los potenciales riesgos para la salud y para el ambiente asociados a la contaminación del sitio.
- ◆ La necesidad de ejecutar medidas de remediación.

Los objetivos específicos y el alcance de la caracterización del sitio dependen de las particularidades de cada caso.

La fase de caracterización comprende el desarrollo de las siguientes etapas:

- ◆ MD (= Muestreo de caracterización)
- ◆ ERSA: facultativo
- ◆ Estudio de caracterización (EC)

A continuación se describen los principales pasos a seguir en cada una de estas etapas.

3.2. Muestreo de detalle

El MD tiene la finalidad de determinar el área y el volumen de suelo contaminado, la cantidad y la distribución espacial de los contaminantes en el sitio, sus tasas móviles y su posible extensión hacia otros componentes ambientales.

3.2.1. OBJETIVOS

Los objetivos específicos de este muestreo se desarrollan con base en el MCS y su alcance se determina en función a los objetivos de caracterización de este. Lo que implica que las mediciones en campo del MD deben servir para complementar el MCS, con el fin de comprobar

o descartar la presencia de fuentes o focos de contaminación, rutas de migración de los contaminantes en los diferentes componentes ambientales (por ejemplo, transporte de la contaminación a través del agua subterránea o de la fase gaseosa del suelo), vías de exposición y receptores humanos o ambientales relevantes.

Al final de la caracterización del sitio debe contarse con una clara visión sobre la contaminación en él y sus posibles interrelaciones con el ambiente y deben haberse generado datos registrables que permitan formular conclusiones sobre la necesidad de tomar acciones correctivas o medidas de remediación.

Los resultados del sirven también para el desarrollo de una ERSa y para la planificación de medidas de remediación, en caso corresponda.

En tal sentido, el MD puede incluir mediciones que no estén directamente vinculadas con determinar la contaminación del sitio, sino que tienen por fin establecer los parámetros geotécnicos que se requieren para la planificación de las obras civiles planteadas en el marco de la remediación del sitio⁴⁶.

3.2.2. PLAN DE MUESTREO

Antes de realizar el MD se elabora un plan de muestreo, de acuerdo con lo indicado en la guía para el muestreo de suelos⁴⁷ (MINAM, 2014).

Para el plan del muestreo de suelos es necesario definir con claridad los objetivos que permitan un óptimo proceso de recojo de la información necesaria para la descripción del sitio. Así, se deben definir:

- ◆ Objetivos del muestreo.
- ◆ Área en la que se focalizarán los esfuerzos

de muestreo.

- ◆ Tipos y técnicas de muestreo.
- ◆ Determinación del número y la posición de los puntos de muestreo.
- ◆ Procedimientos logísticos de campo (accesos, gestión de residuos, etc.).
- ◆ Métodos de conservación y transporte de muestras.
- ◆ Necesidades analíticas a desarrollarse.
- ◆ Medidas para el control y el aseguramiento de la calidad.
- ◆ Aspectos de HSE a considerarse en el desarrollo de los trabajos de campo.

Mayor información sobre el desarrollo del *plan de muestreo de detalle* se encuentra en la guía para el muestreo de suelos (MINAM, 2014)⁴⁸.

3.2.3. EJECUCIÓN

El MD se ejecuta de acuerdo con las actividades planteadas en el respectivo plan de muestreo. En este contexto puede ser necesario el desarrollo de talleres o charlas con las autoridades y la población involucrada para informar sobre los trabajos previstos y coordinar asuntos logísticos y de seguridad comunitaria (ver también 1.3 y el capítulo 5).

Durante los trabajos de campo pueden presentarse imprevistos y hallazgos que hagan necesaria la adaptación del muestreo a las condiciones del sitio. Los cambios en el plan de muestreo son debidamente sustentados y comunicados a la autoridad competente.

Su modificación puede ser necesaria, por ejemplo, cuando se identifiquen durante el trabajo de campo fuentes de contaminación que no se esperaban a partir de los resultados obtenidos en la fase de identificación; en este caso puede

46. En un capítulo anterior (ver 1.8) se presentaron ejemplos del alcance del MD para los cinco principales tipos de contaminación en sitios contaminados. Estos son ejemplos de carácter orientador cuya principal finalidad es explicitar los principios de las estrategias de muestreo en los diferentes escenarios de contaminación.

47. Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM

48. Asimismo, se recomienda consultar obras de la literatura internacional al respecto, como la guía canadiense (CCME, 2016a) o la norma mexicana (Estados Unidos Mexicanos, 2006).

requerirse ampliar el alcance del muestreo en función de los nuevos hallazgos. Igualmente, pueden encontrarse durante el muestreo situaciones de contaminación u otras condiciones de riesgo no previstas (por ejemplo, inestabilidad física del suelo o de las edificaciones) que demanden adaptar el muestreo y las medidas de seguridad y salud ocupacional.

La finalidad de la toma de muestras es siempre cumplir con los objetivos del muestreo (por ejemplo, delimitar la extensión vertical y horizontal de la contaminación en el suelo). En ese sentido, la adaptación de las actividades de muestreo a las condiciones reales del sitio es en general pertinente, siempre y cuando esté técnicamente sustentada.

3.2.4. EVALUACIÓN Y REPORTE DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante el MD, tanto de campo como analíticos, son evaluados y reportados en el EC (ver 3.5).

La evaluación de los datos involucra, entre otros aspectos, su validación de acuerdo con los objetivos y los indicadores de calidad de los datos establecidos previamente en el PACal (ver 1.4). Los datos del muestreo se evalúan e interpretan en combinación con los resultados de la fase de identificación para corroborar la información, identificar datos faltantes y determinar la plausibilidad de los hallazgos y de la información obtenida.

Los nuevos conocimientos del MD se utilizan para retroalimentar el MCS inicial con el fin de obtener una versión actualizada. Para ello se toman como base el MCS inicial que se elaboró en el marco de la fase de identificación. Las hipótesis del MCS inicial se contrasta con los datos y la información obtenida por el muestreo.

Una tarea importante en este contexto es determinar las extensiones verticales y horizontales de las fuentes y los focos de contaminación del suelo encontrados en la fase de identificación. También, verificar la existencia de potenciales rutas de migración de los contaminantes y las

afectaciones de otros componentes ambientales, como aguas subterráneas, sedimentos, aguas superficiales, etc., en caso corresponda.

Los resultados del MD, tanto de campo como de laboratorio, están detalladamente documentados en el EC, lo que involucra adjuntar al informe los materiales utilizados como bitácoras de campo, fichas de muestreo, perfiles geológicos de las perforaciones, informes de ensayos analíticos, etc. (ver anexo 2).

Además, se deben presentar e ilustrar los resultados obtenidos en tablas, mapas y perfiles de suelos. El alcance y los tipos de presentación están en función de la complejidad del estudio, y deben ayudar a entender los hallazgos de la caracterización del sitio.

Anteriormente (ver 2.3.6) se presentaron algunos ejemplos de ilustración de los resultados analíticos en mapas y perfiles de suelo. A pesar de que estos ejemplos se refieren a resultados del MI, pueden aplicarse en igual forma a los resultados del MD.

3.3. Evaluación de riesgos a la salud y el ambiente

La ERSA comprende la elaboración de un estudio detallado que tiene como objetivo:

- ◆ Analizar los riesgos para la salud y para el ambiente asociados al sitio contaminado.
- ◆ Determinar la necesidad de ejecutar medidas de remediación.
- ◆ Establecer niveles de remediación específicos al igual que otras medidas orientadas a disminuir los riesgos a niveles aceptables para la salud y para el ambiente.

La elaboración del referido estudio detallado es de carácter facultativo, salvo que la autoridad competente lo solicite, en virtud de la complejidad del caso, la población potencialmente afectada y la magnitud de la contaminación que se presente en el sitio. Su aprobación necesita la opinión técnica favorable del Ministerio de Salud.

Para la elaboración de los estudios de ERSA se aplica la Guía para la elaboración de estudios de ERSA en sitios contaminados⁴⁹ (MINAM, 2015).

3.4. Sobre la necesidad de remediar un sitio contaminado

En general, la necesidad de remediar un sitio se produce cuando su caracterización constata una contaminación en el suelo y, eventualmente, en otros componentes ambientales que representan un riesgo potencial o comprobado para la salud de las personas o para la sanidad del ambiente, teniendo en cuenta el uso actual del sitio y su uso futuro planificado.

En estos casos, por lo común, existe la necesidad de ejecutar medidas de remediación. Los objetivos de la remediación, las medidas a aplicarse, etc., se detallan en el *plan dirigido a la remediación* (PdR) (ver 4.7).

Si no se hubiesen cuantificado los riesgos de forma específica a través de un estudio de ERSA, la estimación de estos se realiza con base en la presencia de rutas y vías de exposición para los receptores humanos o ambientales a la contaminación del sitio.

Para determinar la existencia de una situación de riesgo potencial se aplican los ECA para suelo, los NdF (si fuesen mayores que los ECA) o los estándares internacionales para parámetros no regulados, previa aprobación de estos valores por el MINAM. De forma facultativa se puede realizar un estudio de ERSA con el fin de determinar valores específicos para el sitio.

En otras palabras, cuando en un sitio se superan los valores mencionados en el ECA para suelo existe por lo general una situación de riesgo potencial, la cual debe evaluarse detalladamente en el marco de la caracterización del sitio. Esta estimación de riesgos puede tener como resultado los tres tipos de escenarios ya conocidos en la fase de identificación:

- ◆ A: riesgo inmediato agudo
- ◆ B: riesgo potencial indefinido
- ◆ C: bajo riesgo o bajo nivel de evidencia

Como se ha expuesto (ver 2.5) existen claves que ayudan a clasificar el tipo de riesgo potencial del sitio con base en los resultados del muestreo de suelos.

- ◆ En un escenario A: riesgo inmediato agudo, es imprescindible la ejecución en el corto plazo de medidas de remediación; además, puede requerirse la aplicación inmediata de medidas de emergencia, las cuales están en función de los riesgos identificados.
- ◆ En un escenario B: riesgo potencial indefinido, por lo general existe la necesidad de realizar medidas de remediación. El alcance y el momento de estas dependen de las particularidades de cada caso. De todas maneras, debe evitarse que la contaminación del sitio afecte a las personas o al ambiente en su entorno (por ejemplo, a través de una migración relevante de contaminantes fuera del sitio por aguas superficiales o subterráneas). En estos casos se adoptan medidas de remediación de corto o de mediano plazo (dependiendo del grado de los riesgos potenciales identificados). En sitios contaminados que tengan actividades en curso puede ocurrir que una remediación signifique cortapisas no tolerables para las operaciones o que resulte, por otros motivos, no viable o proporcional. Esto lleva a evaluar la posibilidad de postergar la remediación hasta la fase de cierre (parcial o total) de las operaciones. Sin embargo, esta opción solo se aplica cuando la contaminación en el sitio no afecte a su entorno y, al mismo tiempo, puedan controlarse los riesgos en el sitio con otras medidas (por ejemplo, medidas de seguridad ocupacional) para proteger a los trabajadores y a otras personas que circulan en el sitio.
- ◆ En un escenario C: bajo riesgo o baja evidencia, no será necesario remediar el sitio con-

49. Resolución Ministerial N° 034-2015-MINAM

taminado. Esto puede ocurrir, por ejemplo, cuando la caracterización del sitio determina una contaminación local que no esté vinculada a una fuente de contaminación. Al mismo tiempo es importante que no existan usos sensibles en el sitio, como centros de educación inicial o que se ubique en un área de protección para fuentes de agua potable, etc.

La estimación del riesgo potencial siempre debe considerar «un caso realista peor». Esto significa que se deben asumir criterios conservadores y desfavorables si faltasen datos o existiese gran incertidumbre, pero en términos realistas, es decir, no deben ser demasiado conservadores ni demasiado desfavorables.

La estimación del riesgo potencial y, por ende, la toma de decisiones sobre la necesidad de remediar un sitio, requiere de experiencia y conocimientos técnicos muy especializados. Asimismo, es crucial que en el proceso de toma de decisiones se consideren también otros criterios como la viabilidad técnica de la remediación, la proporcionalidad de los costos de intervención para el responsable del sitio y aspectos sociales o comunitarios, de ser el caso.

Por último, se recomienda para los casos con gran incertidumbre sobre el riesgo potencial del sitio la elaboración de un estudio de ERSA, con el fin de determinar con mayor claridad la presencia de riesgos inaceptables para la salud de las personas o la preservación del ambiente.

La decisión sobre la necesidad de remediar un sitio contaminado, el momento en el cual se ejecuta (por ejemplo, inmediatamente o en el marco del cierre de la actividad), su alcance, etc., está a cargo de las autoridades competentes⁵⁰.

Sin embargo, el responsable del sitio contaminado debe presentar a dicha autoridad en el EC

una evaluación sobre la necesidad de remediar el sitio y, en caso corresponda, una propuesta conceptual sobre los objetivos y el alcance de la remediación. Esta evaluación se realiza con base en el MCS, y las decisiones deben tomarse en función de los riesgos identificados para las personas y para el ambiente. En todos los casos es imprescindible que las evaluaciones se basen en información validada y confiable y que se expliciten la incertidumbre y las limitaciones del estudio. También resulta crucial que las conclusiones y las recomendaciones estén debidamente sustentadas.

3.5 Estudio de caracterización de sitios contaminados

Los resultados de la fase de caracterización deben ser validados, sistematizados y analizados en el EC, cuya estructura general se presenta en el anexo 3.

De acuerdo con la norma⁵¹, la presentación del EC puede realizarse por separado o como parte del PdR, para su respectiva aprobación por la autoridad competente.

Si el EC se presentase por separado, la autoridad competente determina, en el documento en el que lo aprueba, si existe la necesidad de elaborar un PdR del sitio contaminado y, si correspondiese, puede disponer la ejecución de las medidas de acción inmediata que resulten necesarias frente a situaciones que impliquen un riesgo inminente para la salud o para el ambiente, con el fin de asegurar su protección.

De forma tal que la fase de caracterización concluya no solo con el diagnóstico sino con el señalamiento concreto de la intervención necesaria.

50. Numeral 7.4 del artículo 7 de los Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados, aprobados por el Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM.

51. Numeral 7.3 del artículo 7 de los Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados, aprobados por el Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM"



Elaboración del plan dirigido a la remediación

A continuación se presentan los conceptos generales de la remediación de sitios contaminados, y se brindan los lineamientos técnicos para la elaboración del PdR.

(4)

4.1. Principios y enfoques para la remediación de sitios contaminados

El objetivo principal de una remediación es dejar un sitio en condiciones aceptables y seguras para las personas y para el ambiente, considerando el uso actual y previsto del sitio, en caso corresponda, y maximizar en la medida de lo posible sus usos futuros.

Para las actividades de remediación, la gestión del sitio requiere de una planificación detallada la cual incluye, por lo menos, los siguientes componentes:

- ◆ Identificación de los actores claves involucrados y sus responsabilidades.
- ◆ Definición de los objetivos de la remediación y de los criterios de aceptación por parte de las autoridades competentes y de los actores claves.
- ◆ Evaluación de las alternativas de remediación y selección de la opción preferida.

- ◆ Identificación de requisitos, permisos o licencias para el desarrollo de las medidas previstas.
- ◆ Documentación, monitoreo y control de la calidad durante la ejecución de la remediación.
- ◆ Definición del programa de comprobación para demostrar la conclusión exitosa de la remediación, incluyendo el monitoreo pos-remediación, de ser requerido.

4.2. Tipos de medidas de remediación

La finalidad de cualquier medida de remediación es eliminar o reducir a niveles aceptables los riesgos para la salud de las personas o para el ambiente asociados a la contaminación en el sitio. Los objetivos de remediación específicos varían para cada caso, y su definición es un aspecto clave en la elaboración del PdR (ver 1.6 y 4.7).

DEFINICIONES

MEDIDAS DE ASEGURAMIENTO

Son aquellas técnicas de remediación que tienen por objeto evitar la dispersión de los contaminantes a largo plazo o disminuir la exposición de los receptores a niveles que no impliquen riesgos para la salud y el ambiente. Estas medidas pueden contemplar, por ejemplo, el encapsulamiento, confinamiento, sellado, inmovilización, drenaje de gases y barreras hidráulicas o permeables.

MEDIDAS DE DESCONTAMINACIÓN.-

Comprenden aquellas técnicas de remediación que tienen por objeto eliminar o reducir los contaminantes del sitio hasta alcanzar los ECA para suelo, los niveles de fondo o los niveles establecidos en el Estudio de Evaluación de Riesgos a la Salud y el Ambiente (ERSA). Esta clase de medidas pueden contemplar técnicas fisicoquímicas (como la excavación de suelo contaminado, extracción del aire del suelo, bombeo y tratamiento de aguas subterráneas, enjuague de suelos y tratamientos químicos *in-situ*), biológicas (como la biodegradación *in-situ*, fitorremediación, *landfarming*, tratamientos *ex-situ*, *on-site* y *off-site* en biopilas y compostaje), térmicas (como la incineración y desorción térmica), entre otras.

Fuente: Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados, aprobados por el Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM

4.2.1. DEFINICIÓN Y ALCANCE

La remediación no significa necesariamente una eliminación o una reducción de la contaminación en el sitio. Este tipo de medidas, es decir, las que tienen como finalidad eliminar o reducir la concentración de los contaminantes en el sitio, se consideran «medidas de descontaminación».

Para disminuir los riesgos del sitio se pueden aplicar también «medidas de aseguramiento»,

las cuales tienen por objeto evitar la dispersión de los contaminantes en el largo plazo o disminuir la exposición de los receptores a niveles que no impliquen riesgos para la salud y para el ambiente.

Las medidas de remediación no son las únicas que pueden aplicarse para proteger a las personas y al ambiente ante los riesgos generados por la contaminación en el sitio. En este contexto se pueden mencionar las medidas de acción inmediata (ver 4.3.1), los controles institucionales (ver 4.3.2) y la atenuación natural monitoreada (ANM) (ver 4.3.3) (ilustración 29).

Cada una de estas medidas tiene un alcance específico (ilustración 30).

El desarrollo de la propuesta de medidas de remediación se realiza con base en los resultados de la caracterización del sitio. En algunos casos puede ser necesario efectuar evaluaciones especiales (por ejemplo, ensayos de laboratorio, pruebas piloto en campo, etc.) para determinar la aptitud técnica de una medida de remediación en un caso concreto.

En el planteamiento de la propuesta de remediación se considera, entre otros, la viabilidad y la proporcionalidad de las diferentes opciones propuestas.

En muchos casos, se aplican en forma conjunta varias medidas o técnicas con el fin de cumplir con los objetivos de la remediación.

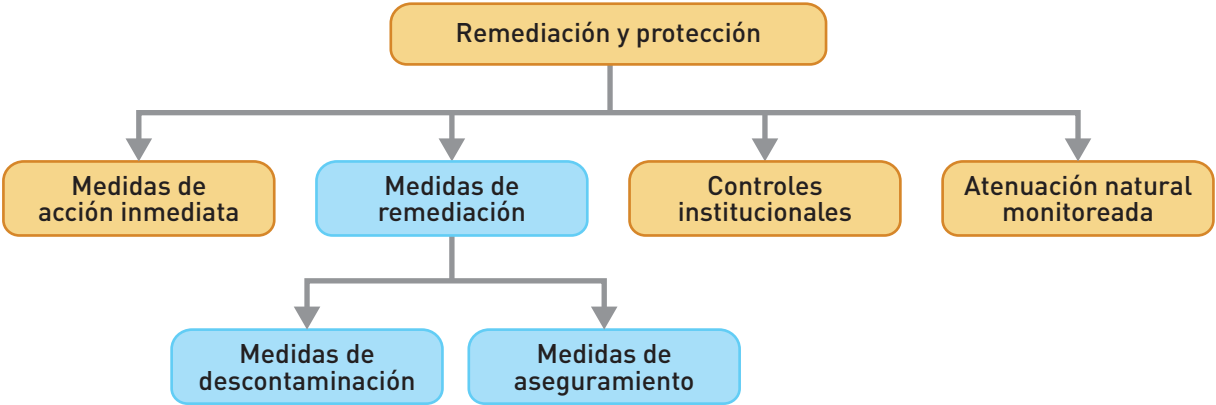
4.2.2. MEDIDAS DE DESCONTAMINACIÓN

La descontaminación significa la eliminación o la reducción de los contaminantes en el suelo, o en los otros componentes ambientales afectados, como el agua subterránea o la fase gaseosa del suelo.

La eliminación o la reducción de la concentración de los contaminantes puede realizarse de diferentes formas, por ejemplo a través de:

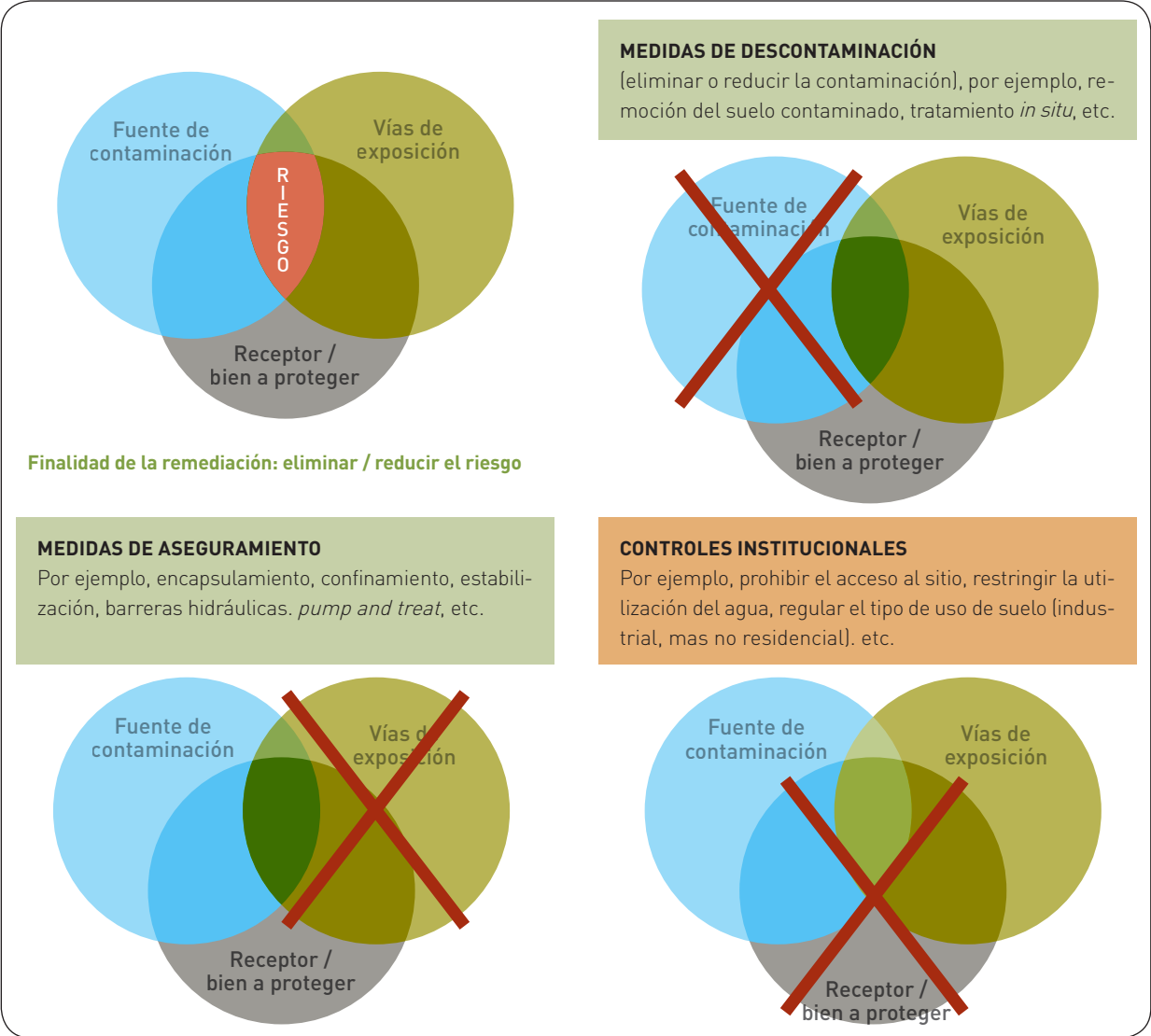
- ◆ Una separación física, por ejemplo como fase o condensado.

ILUSTRACIÓN 29. Medidas de remediación y protección de las personas y el ambiente frente a los riesgos asociados a un sitio contaminado: tipos



Elaboración propia.

ILUSTRACIÓN 30. Medidas de descontaminación, medidas de aseguramiento y restricciones institucionales: opciones para eliminar o reducir los riesgos en un sitio contaminado



Elaboración propia.

- ◆ Una separación junto a una fracción del suelo (usualmente la fracción fina).
- ◆ Un ligado físico o químico a un material idóneo, como carbono activado.
- ◆ Un cambio de la estructura química por reacciones químicas o biológicas.

La descontaminación se puede realizar en diferentes lugares (*in situ*, *ex situ*, *on-site*, *off-site*), es decir, directamente en el suelo o después de una excavación de los suelos contaminados, la extracción de aguas subterráneas contaminadas o la aspiración de vapores de gases o contaminantes volátiles. En los últimos casos se realiza la descontaminación usualmente en plantas de tratamiento. La excavación de suelos contaminados y la disposición final de estos, por ejemplo en un relleno de seguridad, también se considera como una medida de descontaminación del sitio.

Las posibilidades de descontaminación son, por lo menos en teoría, numerosas. En sitios contaminados se encuentran muchas veces mezclas de contaminantes con características distintas, los que pueden influenciarse entre sí. Además, los contaminantes forman, en conjunto con las condiciones geológicas, hidrogeológicas y geoquímicas del sitio, un sistema complejo, lo que requiere la consideración de varios factores en la planificación de las medidas de descontaminación.

4.2.3. MEDIDAS DE ASEGURAMIENTO

Las medidas de aseguramiento tienen la finalidad de evitar o disminuir la dispersión de los contaminantes en el largo plazo. Asimismo, pueden tener como objetivo eliminar o reducir la exposición de los receptores a la contaminación.

En ese sentido, son medidas que no eliminan los contaminantes en el sitio. Ante este hecho, se consideran algunos aspectos en el análisis de la evaluación técnica y económica de las medidas de aseguramiento:

- ◆ Se necesita controlar continuamente su eficacia, monitoreo que genera gasto corriente.
- ◆ La contaminación en el sitio asegurado puede devaluar el valor del terreno, lo que puede tener implicancias económicas en el caso de una venta del sitio asegurado.

4.2.4. TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN

En el ámbito internacional, existe una gran variedad de técnicas de remediación para sitios contaminados de probada efectividad. Se utilizan diferentes formas de clasificación de las técnicas de remediación. Una clasificación común es diferenciar las técnicas de remediación de acuerdo con su lugar de aplicación:

- ◆ Técnicas *in situ*: aquellas que se aplican en el propio sitio sin realizar una remoción previa de los suelos o de los otros medios contaminados.
- ◆ Técnicas *ex situ*: aquellas que se aplican después de realizar una remoción de los suelos o de los otros medios contaminados.
- ◆ Técnicas *on-site*: aquellas técnicas *ex situ* que se aplican en el propio sitio.
- ◆ Técnicas *off-site*: aquellas técnicas *ex situ* que se realizan fuera del sitio.

Para la remediación de un sitio contaminado suelen usarse combinaciones de técnicas por la necesidad de tratar distintos contaminantes o medios (suelo, gases/vapores, agua subterránea).

Por ejemplo, la remediación de una estación de servicio (grifo) puede incluir las siguientes técnicas de remediación: bombeo (*in situ*) y tratamiento (*on-site*) del agua subterránea, aplicación de extracción de vapores del suelo (*in situ*), absorción de vapores en carbón activado (*on-site*), e incineración del carbón activado agotado en tratador autorizado (*ex situ*).

La decisión de tratar los suelos u otros componentes ambientales contaminados *in situ* o previa remoción depende de las particularidades de cada caso y de las principales ventajas

TABLA 11. Técnicas de remediación *in situ*: principales ventajas y desventajas

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Escaso movimiento de masas. ▪ No se requieren autorizaciones para reúso, disposición o descarga de los medios tratados (suelo, agua subterránea, etc.). ▪ Limitadas restricciones para el uso del sitio durante la remediación. ▪ Con frecuencia más económica. ▪ No se requiere transporte de masas contaminadas. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dificultad de controlar la eficacia de la medida y de comprobar que se alcanzaron los objetivos de remediación. ▪ Riesgo de movilizar contaminantes. ▪ A veces, la larga duración de la remediación. ▪ Con frecuencia no es posible la eliminación completa de la contaminación. ▪ Dificultades para obtener las autorizaciones requeridas (por ejemplo, para insertar sustancias al agua subterránea).

Fuente: elaboración propia con base en Bihler *et al.*, 2000.

y desventajas de los tratamientos *in situ* (tabla 11).

Además, se pueden clasificar las técnicas según los procesos que tengan lugar durante la remediación:

- ◆ Técnicas biológicas
- ◆ Técnicas físico-químicas
- ◆ Técnicas térmicas
- ◆ Técnicas de contención

Técnicas biológicas

Como su nombre indica, son aquellas en las que prima el componente biológico sobre el resto de procesos y que están enfocadas en favorecer la biodegradación de los contaminantes mediante la potenciación de los microorganismos existentes en el suelo.

Estas técnicas implican la manipulación, por parte del hombre, de los procesos de biodegradación para que ocurran de manera controlada y con mayor velocidad que en forma natural. Los objetivos de la biorremediación consisten en la degradación total o parcial de sustancias orgánicas con el fin de disminuir su impacto físico en el ambiente y/o su toxicidad. Entre ellas se pueden citar:

- ◆ Bioventilación (*bioventing*): técnica *in situ*

que consiste en extraer y/o inyectar aire en la zona no saturada del terreno para potenciar la biodegradación aeróbica. Aplicable a COV no halogenados, gasolinas y gasóleos.

- ◆ Inyección de aire comprimido (*biosparging*): técnica *in situ* que consiste en inyectar aire comprimido a bajo caudal en la zona saturada del terreno (bajo el nivel freático) para potenciar la proliferación de microorganismos degradadores. Aplicable a COV no halogenados y halogenados, gasolinas y gasóleos.
- ◆ Biopilas: técnica *ex situ* que consiste en apilar suelos excavados en condiciones favorables para el desarrollo de microorganismos biodegradadores de contaminantes. Los suelos deben acondicionarse en su contenido de nutrientes y favorecer su aireación, la inyección y/o la extracción de aire. Aplicable a COV halogenados y no halogenados, gasolinas y gasóleos.
- ◆ Fitorremediación: técnica *in situ* basada fundamentalmente en la característica de asimilación de sustancias contaminantes de ciertas plantas. Estos absorben el contaminante (en forma acuosa) a través de las raíces y lo metabolizan y transforman en especies químicas no o menos contaminantes para el medio circundante (por

ejemplo, biomasa).

- ◆ Tratamiento de la tierra superficial (*landfarming*): técnica *ex situ* que consiste en disponer los suelos excavados en áreas para posteriormente proceder a su arado y/o volteo con el objetivo de potenciar la acción microbiana. Aplicable a COV halogenados y no halogenados, gasolinas y gasóleos.

Técnicas físico-químicas

Son aquellas técnicas de descontaminación en las cuales los procesos de índole física, química o físico-química tienen lugar predominantemente durante el transcurso de la remediación de suelos y/o aguas subterráneas. Entre ellas están:

- ◆ Disposición de suelos: excavación y disposición de los suelos contaminados con o sin tratamiento previo. Esta disposición puede realizarse en el sitio, por ejemplo en celdas de seguridad, o fuera del sitio, por ejemplo en un relleno de seguridad.
- ◆ Lavado de suelos: técnica *in situ* o *ex situ* que consiste en infiltrar aditivos en la zona no saturada del terreno (*in situ*) o proceder al lavado de los suelos excavados en una solución acuosa mezclada con agentes (*on-site* o *ex situ*). El lavado de los suelos se realiza mediante agentes quelantes⁵², surfactantes⁵³, ajustadores del nivel de acidez⁵⁴, disolventes, etc. Aplicable a un amplio abanico de sustancias contaminantes, incluidos los metales pesados.
- ◆ Extracción de vapores (*soil vapor extraction*): técnica *in situ* que consiste en extraer los vapores atrapados de la fase gaseosa del suelo (zona no saturada) del sitio, por ejemplo mediante una bomba de vacío conectada a una red de pozos de extracción, lo que provoca un gradiente de presión/concentración. Aplicable a COV halogenados y no halogenados, gasolinas y, en me-

nor medida, a gasóleos.

- ◆ Bombeo y tratamiento (*pump & treat*): técnica *in situ* que consiste en la extracción mediante bombeo de las aguas subterráneas contaminadas para proceder a su posterior tratamiento. Los tipos de bombas a utilizar pueden ser muy diversos (eléctricas, neumáticas, etc.) al igual que los sistemas de tratamiento posterior (separación de fases mediante separadores de hidrocarburos, torres de aireación, filtros de carbón activo, etc.). Aplicable a un amplio abanico de sustancias contaminantes.
- ◆ Oxidación química *in situ* (*in situ chemical oxidation*): técnica basada en procesos de oxidación que consiste en inyectar agentes oxidantes en el subsuelo para provocar la oxidación de las sustancias contaminantes, reduciendo su concentración y/o transformándolas en otras menos tóxicas o nocivas. Los agentes oxidantes comúnmente utilizados son permanganato sódico o potásico, persulfato, ozono, peróxido de hidrógeno (reacción de Fenton), etc. Es aplicable para la reducción de las concentraciones de solventes clorados (PCE, TCE) y componentes de las gasolinas (BTEX, MTBE).
- ◆ Reducción química *in situ* (*in situ chemical reduction*): técnica basada en procesos de reducción química que consiste en inyectar agentes reductores en el subsuelo para provocar la reducción química de las sustancias contaminantes, disminuyendo su concentración y/o transformándolas en otras menos tóxicas o nocivas. Los agentes reductores comúnmente utilizados son: hierro cerovalente (ZVI), sulfato (II) de hierro, ditionito de sodio, bisulfito de potasio, etc. Es aplicable para la reducción de las concentraciones de algunos solventes clorados y para la transformación de cromo hexavalente (cromo VI) a cromo III.

52. Se denomina así a los agentes secuestrantes o antagonistas de los metales pesados.

53. Se llama así a los agentes activos de superficie.

54. Se les conoce como «ajustadores del pH», en referencia al índice de acidez (pH).

- ◆ **Estabilización:** técnica *in situ*, *on-site* o *ex situ* que involucra el tratamiento por el cual se inmovilizan contaminantes formando un producto sólido estable. La estabilización de los residuos evita la migración/lixiviación de los compuestos peligrosos. Su objetivo es generar un producto estabilizado que sea química y físicamente aceptable para los organismos; lo que se logra mediante la introducción de varios agentes encapsulantes no contaminantes en residuos líquidos o fangosos, o en suelo contaminado. Asimismo, se puede disminuir la movilidad de los contaminantes (por ejemplo, metales) por aumento del pH al agregar sustancias como cal, cemento, o químicos específicos.

Técnicas térmicas

Son técnicas que requieren del aporte de calor externo (elevación de la temperatura) para provocar la volatilización, la estabilización o la oxidación de las sustancias contaminantes presentes en los suelos. Entre ellas se pueden citar:

- ◆ **Vitrificación:** técnica *in situ* o *ex situ* que consiste en estabilizar los contaminantes presentes en los suelos mediante la aplicación de altas temperaturas. Aplicable a una amplia gama de compuestos contaminantes.
- ◆ **Desorción térmica:** técnica *on-site* u *off-site* que consiste en calentar los suelos en un horno a temperaturas de bajas a medias, entre 90 y 590 °C, para volatilizar los contaminantes orgánicos y el mercurio que se incorporan a una corriente de gas a tratar (oxidación catalítica) antes de su emisión a la atmósfera.
- ◆ **Incineración:** técnica *on-site* u *off-site* que consiste en someter a los suelos a altas temperaturas, entre 870 y 1370 °C, para oxidar y volatilizar los contaminantes orgánicos.

Técnicas de contención

Son técnicas de tratamiento *in situ* o *ex situ* que

no reducen las concentraciones de los contaminantes presentes en el suelo, sino que consisten en aislar o contener los suelos contaminados de forma que no representen un riesgo para las personas o para el ambiente. Entre ellas se pueden mencionar:

- ◆ **Cubrimiento o confinamiento:** utilizar geomembranas y suelos / sustratos técnicos, pavimento, losas de cemento, etc., para cubrir o confinar la contaminación.
- ◆ **Encapsulado:** utilizar, por ejemplo, barreras físicas (pantallas de baja permeabilidad, tablestacado) o hidráulicas (bombeo de aguas subterráneas) para encapsular la contaminación y, de esa manera, evitar la liberación de contaminantes al ambiente.
- ◆ **Pantallas permeables:** combinación de un encapsulado parcial de la contaminación y un sistema de tratamiento *in situ* en pantallas permeables (aplicable para la remediación de aguas subterráneas).

4.3. Otras medidas de gestión de un sitio contaminado

Estas incluyen medidas de acción inmediata, controles institucionales y atenuación natural moderada.

4.3.1. MEDIDAS DE ACCIÓN INMEDIATA

Las medidas de acción inmediata tienen como finalidad la protección de las personas o el ambiente frente a situaciones de riesgo inminente. En tal sentido, pueden ser medidas que enfrenten amenazas para la seguridad pública o eviten la dispersión de contaminantes en el ambiente. No se trata necesariamente de medidas que tengan como finalidad eliminar de forma permanente los riesgos (inaceptables) para la salud o para el ambiente, en el sentido de una medida de remediación (ver 4.2). Por ese motivo, estas medidas se aplican usualmente después de un accidente o después de determinar un riesgo inminente en el marco de la evaluación de un sitio. Ejemplos

TABLA 12. Principales técnicas de remediación aplicables para descontaminación y aseguramiento

Técnica de remediación	Descontaminación			Aseguramiento	
	<i>In situ</i>	<i>On-site</i>	<i>Off-site</i>	<i>In situ</i>	<i>On-site</i>
Bioventilación	X	—	—	—	—
Inyección de aire comprimido	X	—	—	—	—
Biopilas	—	X	X	—	—
Fitorremediación	X	(X)	(X)	—	—
Aradura	—	X	X	—	—
Disposición directa	—	X	X	—	X
Lavado de suelo	X	X	X	—	—
Extracción de vapores	X	—	—	—	—
Bombeo y tratamiento	X	X	—	X	X
Oxidación / reducción química <i>in situ</i>	X	—	—	—	—
Estabilización	—	—	—	X	X
Vitrificación	—	—	—	X	—
Desorción térmica	X	X	X	—	—
Incineración	—	X	X	—	—
Cubrimiento / confinamiento	—	—	—	X	—
Encapsulado	—	—	—	X	—
Pantallas permeables	X	—	—	X	—

X = Aplicable / (X) = Aplicable en ciertos casos / — = No aplicable
Elaboración propia.

de medidas de acción inmediata son, entre otras, las siguientes:

- ◆ Restricciones de acceso y medidas de evacuación
- ◆ Excavación de suelos en áreas contaminadas
- ◆ Instalación de barreras para líquidos flotantes
- ◆ Aplicación de agentes espesantes
- ◆ Cobertura de áreas contaminadas
- ◆ Aereación, ventilación o succión de vapores o de aire contaminado

4.3.2. CONTROLES INSTITUCIONALES

Además de las medidas de descontaminación

o aseguramiento, las autoridades competentes pueden aplicar otras medidas, como controles o restricciones institucionales, para disminuir los riesgos que genera la contaminación del sitio para las personas o para el ambiente. Estas medidas no son de remediación y no «solucionan» el problema de la contaminación en el sitio, sino que se pueden aplicar como acciones inmediatas o alternativas hasta que se puedan ejecutar medidas de remediación.

En algunos casos, cuando la aplicación de medidas de remediación activas no es viable, los controles o las restricciones institucionales pueden ser una alternativa para proteger a las personas o al ambiente. Ejemplos de este tipo de medidas son:

- ◆ Prohibición o restricción del acceso al sitio

contaminado.

- ◆ Restricciones en el uso del suelo (por ejemplo, permitir su uso industrial pero no residencial); medida que es un instrumento importante en la planificación urbana.
- ◆ Restricciones para la edificabilidad en el sitio (por ejemplo, prohibir la construcción de sótanos, exigir la construcción de drenajes de gases, etc.).
- ◆ Prohibición del cultivo de plantas útiles o alimentarias.
- ◆ Prohibición de la ganadería o del pastoreo.
- ◆ Prohibición del uso de agua (por ejemplo, restringir el uso de agua para fines de consumo, riego u otros similares si proviene de pozos ubicados en acuíferos contaminados).

4.3.3. ATENUACIÓN NATURAL MONITOREADA

La normativa vigente considera la ANM como una medida excepcional que puede aplicarse cuando se demuestre que no es técnica y/o económicamente viable realizar medidas de remediación⁵⁵. Su aplicación es posible, pero solo en casos particulares bajo requerimientos específicos, los cuales son:

DEFINICIONES

ATENUACIÓN NATURAL MONITOREADA

Es un enfoque de gestión del sitio contaminado en el que se hace seguimiento a los procesos físicos, químicos y biológicos de degradación natural de los contaminantes, que reducen la masa, toxicidad y/o movilidad de la contaminación en suelos o aguas subterráneas a niveles aceptables para la salud y el ambiente.

Fuente: Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados, aprobados por el Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM.

- ◆ Realizar seguimiento al proceso de degradación natural de los contaminantes presentes en el sitio mediante monitoreos periódicos hasta alcanzar los objetivos establecidos en el PdR.
- ◆ Contar con el sustento técnico que permita inferir la degradación natural de los contaminantes y asegurar la no afectación a la salud y al ambiente durante el periodo de su aplicación.
- ◆ Aplicarse de forma conjunta con otras medidas con el fin de proteger la salud de las personas y la calidad del ambiente.

Por ello, puede recurrirse a la ANM solo cuando exista una prognosis positiva sobre la degradación natural de los contaminantes en el sitio que esté técnicamente sustentada.

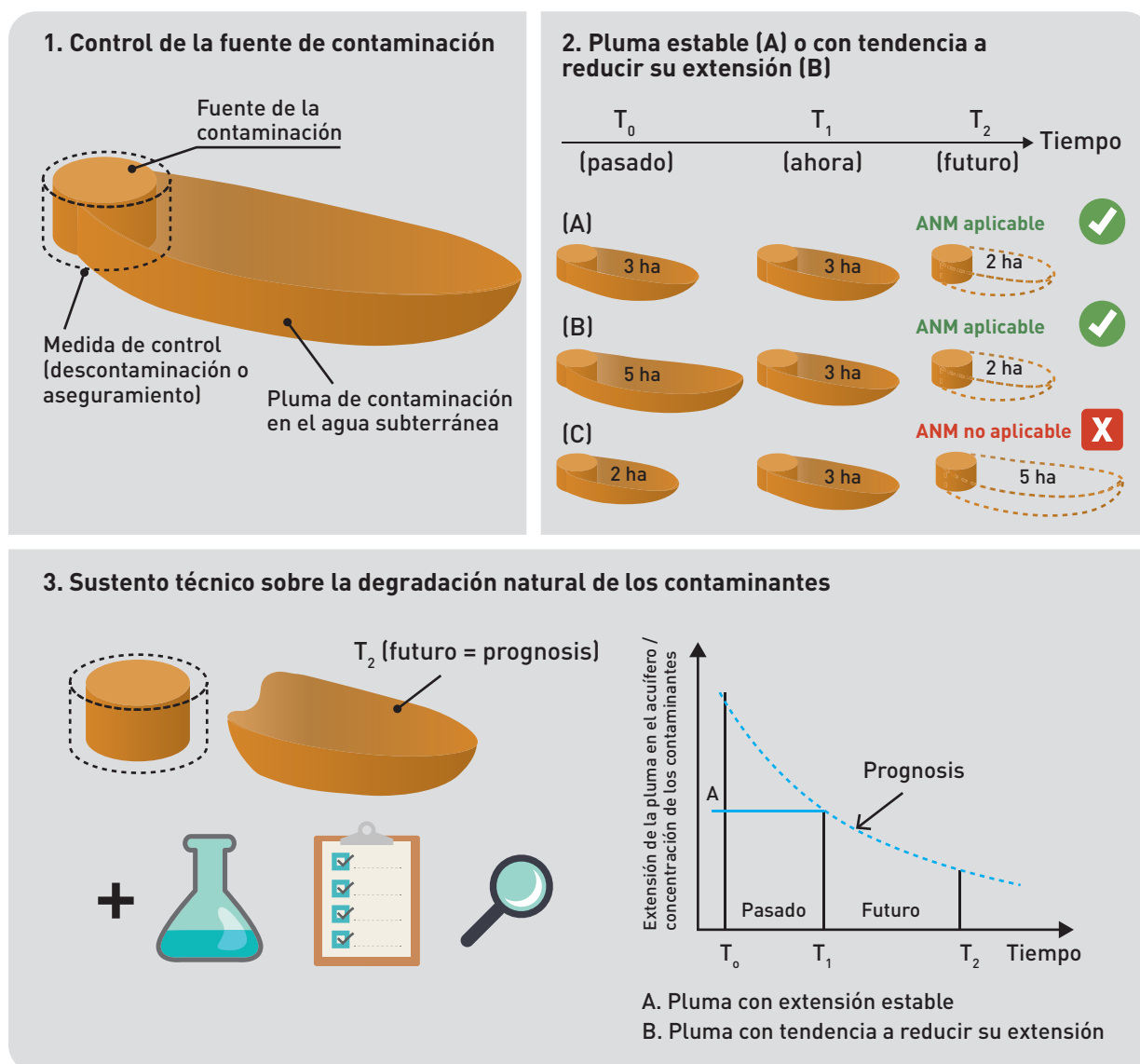
La ANM debe ser lo suficientemente capaz de alcanzar los objetivos de remediación establecidos para el PdR (por ejemplo, los ECA para suelo). En tal sentido, será decisión de las autoridades competentes establecer el tiempo en el cual deban alcanzarse los objetivos de remediación. Para ello se consideran las particularidades de cada caso, sobre todo los potenciales riesgos que existen mientras el sitio permanezca contaminado.

Durante la espera del proceso de degradación natural de los contaminantes no debe existir una situación en la cual la contaminación del sitio afecte directamente la salud de las personas o la salubridad del ambiente. Por ejemplo, la ANM no puede ser una opción cuando un acuífero contaminado amenaza directamente pozos de agua de consumo. Caso en el que se produce la afectación de la salud de las personas por el consumo de agua contaminada y, por ello, la ANM no resulta una opción aceptable.

Esta medida tampoco puede aplicarse cuando la contaminación del sitio se extiende a otros medios ambientales, por ejemplo, una contaminación de suelos con hidrocarburos en una zona de inundación o con contacto directo a ríos u otros cuerpos de agua superficiales o subterráneos. Casos en los que existe una afectación directa al ambiente no debe aplicarse.

55. Numeral 14.3 del Artículo 14 de los Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados, aprobados por el Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM.

ILUSTRACIÓN 31. Atenuación natural monitoreada en aguas subterráneas contaminadas: condiciones para su aplicación



Elaboración propia.

A escala internacional se utiliza la ANM comúnmente en aguas subterráneas contaminadas y, en muchos casos, se aplica al final de las actividades de remediación para controlar la contaminación residual en los acuíferos ante la cual no sería técnica o económicamente viable o proporcional una remediación activa de estos.

De acuerdo con los Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados, las condiciones de aplicación de la ANM en aguas subterráneas contaminadas son:

- ◆ Control previo de las fuentes de contaminación.

- ◆ Que las plumas de contaminación se encuentren estables o con tendencia a reducir su extensión.
- ◆ Sustento técnico que permita inferir la degradación natural de los contaminantes⁵⁶.

Así, la norma pone ciertos «candados» a la aplicación de la ANM en acuíferos contaminados (ilustración 31).

Primero, se requiere un «control previo de las fuentes de contaminación». Esto significa que se deben ejecutar acciones que eviten una futura liberación de contaminantes al acuífero. Para ello

56. Numeral 14.3 del artículo de los Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados, aprobados por el Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM.

se pueden utilizar medidas de descontaminación (por ejemplo, excavación de los suelos contaminados o de los residuos peligrosos) o medidas de aseguramiento (por ejemplo, contención de la fuente con barreras físicas o hidráulicas).

Segundo, se debe sustentar que la «pluma de contaminación es estable o con tendencia a reducir su extensión». Para lo cual se debe contar con datos históricos sobre la extensión de la pluma, es decir, se requiere de resultados analíticos de monitoreos periódicos de pozos o piezómetros que permitan determinar la extensión de la pluma. Si los datos históricos indicasen que la pluma sigue extendiéndose en el acuífero, o si no existiese información sobre la tendencia de la extensión de la pluma, no puede aplicarse la ANM.

Tercero, es necesario un «sustento técnico de la degradación natural de los contaminantes», es decir, debe existir una prognosis positiva de que los procesos naturales en el acuífero permiten degradar los contaminantes hasta alcanzar los objetivos de remediación. Esta prognosis es sustentada mediante datos históricos que evidencien una degradación de la contaminación en el pasado, o resultados de ensayos en laboratorio o de pruebas piloto a escala.

4.4. Análisis de las alternativas de remediación y determinación de las medidas más convenientes

Para la remediación de un sitio contaminado existen usualmente diferentes posibilidades o alternativas de remediación. Asimismo, pueden aplicarse distintas medidas en combinación o de forma complementaria.

En el marco de la elaboración del PdR se realiza un análisis de las alternativas de remediación y seleccionar la propuesta que resulte más conveniente. El número de alternativas depende de la complejidad del caso en concreto. En situaciones sencillas puede ser apropiado presentar

una sola propuesta de remediación y prescindir del análisis de alternativas.

De acuerdo con la normativa vigente, el análisis de alternativas considera los siguientes criterios:

- ◆ Tecnologías disponibles
- ◆ Sostenibilidad
- ◆ Costo-efectividad
- ◆ Factores de ecoeficiencia
- ◆ Resultados de pruebas de laboratorio y/o ensayos piloto (si corresponde)

El análisis de alternativas tiene la finalidad de determinar medidas idóneas, necesarias y apropiadas para la remediación del sitio contaminado. En este contexto es importante considerar también combinaciones de medidas de remediación, y las medidas o las obras complementarias necesarias para realizar la remediación (por ejemplo, obras de construcción civil para lograr la estabilidad física de una zanja de excavación de suelos contaminados, los pretratamientos que se requieran para implementar la alternativa de remediación considerando el tipo de contaminante y las características edafológicas de la zona que permitan cumplir con los objetivos del PdR).

A continuación se presentan los diferentes criterios a tenerse en cuenta en el análisis de alternativas de remediación. Además, el anexo 10 tiene una matriz para el análisis y la ponderación de las alternativas de remediación con base en estos criterios, matriz en la cual los porcentajes de ponderación son ejemplos que pueden adaptarse en función de las prioridades de cada sitio contaminado en concreto.

4.4.1. TECNOLOGÍAS DISPONIBLES

Este criterio tiene como finalidad determinar las mejores tecnologías y técnicas disponibles para la remediación del sitio. Para el análisis, se seleccionan las tecnologías y las técnicas que sean más aptas para remediar la contaminación encontrada en el sitio. Para cada una de estas tecnologías y técnicas se evalúa su ido-

neidad, considerando los factores y las metas que se muestran en la tabla 13.

4.4.2. SOSTENIBILIDAD

Este criterio tiene como finalidad determinar la sostenibilidad de las alternativas de remediación en el tiempo. Sirve también para evaluar la necesidad de seguimiento posremediación, es decir, las medidas técnicas y organizacionales que se requieren para mantener el adecuado funcionamiento de las medidas de remediación.

Las medidas de seguimiento se aplican principalmente en casos que requieren aseguramiento (por ejemplo, encapsulado o confinamiento de suelos contaminados, barreras hidráulicas

o bombeo y tratamiento de aguas subterráneas contaminadas). En cambio, si se aplican medidas de descontaminación se puede asumir que después de comprobar el cumplimiento de los objetivos de remediación ya no será necesario ejecutar medidas de seguimiento.

Los costos del seguimiento pueden tener un efecto significativo sobre la eficacia económica de una remediación, sobre todo para medidas de aseguramiento con largos tiempos operativos (por ejemplo, medida de bombeo y tratamiento de aguas subterráneas contaminadas, capas de confinamiento). Para estos casos, los costos del seguimiento superan con frecuencia los costos de inversión de la instalación o la construcción de las medidas de remediación.

TABLA 13. Factores y metas para el análisis de las mejores tecnologías o técnicas disponibles

N.º	Factor	Meta	Comentario / ejemplos
1	Aptitud de la tecnología / técnica respecto a los contaminantes, los tipos de suelos, los materiales y las características y condiciones naturales* del sitio	Determinar una tecnología / técnica de remediación que sea la más idónea respecto a los contaminantes, el tipo de suelos, los materiales y las características del sitio. Disminuir el riesgo técnico.	<p>El riesgo técnico puede ser mayor para las técnicas innovadoras con pocas experiencias en casos parecidos.</p> <p>En cambio, para las técnicas óptimas actuales se evalúan las experiencias en casos parecidos. Igualmente, se analizan cuánto influyen las características del sitio sobre el éxito de aplicación de la técnica.</p> <p>Ejemplo 1: una técnica innovadora de remediación (por ejemplo, oxidación química <i>in situ</i>) puede ser apta en sitios con suelos permeables (como gravas o arenas), pero ser técnicamente no apta en un sitio con suelos de baja permeabilidad (como limos y arcillas). En cambio, la excavación de suelos contaminados es generalmente posible en cualquier tipo de suelo.</p> <p>Ejemplo 2: La bioestimulación es una tecnología innovadora de remediación, propicia la biodegradación al estimular el crecimiento de microorganismos que degradan las sustancias contaminantes. Esta tecnología es aplicable a derrames de hidrocarburos frecuentes, sin embargo, esta tecnología puede ser no apta para derrames de hidrocarburos antiguos, de más de 30 años de antigüedad.</p>

* Ver anexo 4, ítem 4.4

N.º	Factor	Meta	Comentario / ejemplos
			<p>Otro aspecto importante de la bioestimulación es que requiere de la introducción de nutrientes en el suelo, por lo que su uso en zonas remotas como la amazonía peruana acarrea costos de logística para el transporte de los nutrientes y acondicionamiento del suelo, lo que limitaría su uso en dichas áreas.</p> <p>Finalmente, la bioestimulación implica procesos biológicos aeróbicos pudiendo ser apto para suelos permeables, sin embargo, para suelos impermeables (suelos con contenido alto de arcillas) se requeriría de un pretratamiento que acondicione el suelo para la aplicación de esta tecnología.</p>
2	Eficacia respecto al objetivo de la remediación	Máxima eficacia respecto al objetivo de la remediación.	<p>Cualquier técnica de remediación es idónea para alcanzar los objetivos de remediación; sin embargo, pueden existir diferencias respecto a su eficacia. En general es un criterio positivo que la técnica seleccionada sea capaz de superar los objetivos de remediación planteados.</p> <p><i>Ejemplo 1:</i> en la contaminación superficial del suelo con plomo el objetivo de la remediación es alcanzar los ECA para suelo de uso residencial; y la técnica de remediación, excavación de los suelos contaminados. En este caso, la remediación puede dejar el sitio en condiciones en las cuales la concentración de plomo en los suelos quede por debajo del ECA residencial.</p> <p><i>Ejemplo 2:</i> En la contaminación de suelo con derrames de hidrocarburos, el objetivo de la remediación es alcanzar los ECA para suelo de uso agrícola; y la técnica de remediación, <i>landfarming</i>. En este caso, dependiendo de las condiciones del sitio contaminado como la antigüedad del derrame, granulometría del suelo y el clima; la eficacia de la técnica de remediación es distinta. Por lo que, se realiza un análisis detallado y evidenciar la eficacia de las tecnologías evaluadas bajo ensayos de laboratorio o estudios piloto de pequeña escala.</p>

N.º	Factor	Meta	Comentario / ejemplos
3	Impacto sobre las personas que se encuentran en el área de influencia	Disminuir los impactos sobre las personas que se encuentran en el área de influencia de la remediación. Se entiende como impactos contaminación acústica, polvo, perturbación del tráfico y otras molestias causadas por las acciones de remediación.	Este criterio tiene como finalidad disminuir los impactos y las molestias que pueden causar las acciones de remediación para las personas en el entorno del sitio contaminado. <i>Ejemplo:</i> la excavación de grandes volúmenes de suelos contaminados puede causar molestias para el entorno (ruidos, polvo, tráfico de los camiones que transportan los materiales retirados, etc.). Estos impactos se consideran como un factor negativo. En cambio, otras técnicas (por ejemplo, los tratamientos <i>in situ</i>) pueden tener impactos mucho menos relevantes para el entorno del sitio.
4	Requerimiento de autorizaciones relacionadas con la ejecución de las acciones de remediación	Disminuir el número de autorizaciones relacionadas con la aplicación de las acciones de remediación.	Este criterio evalúa la necesidad de solicitar permisos o autorizaciones, por ejemplo, para bombeo de agua subterránea, desviación del tráfico, construcción temporal de edificaciones, vías de acceso, etc. En general se considera favorable disminuir el número de autorizaciones y de requerimientos para limitar los esfuerzos administrativos que requiere la ejecución de las medidas de remediación.
5	Requerimiento de medidas de salud y de seguridad ocupacional	Disminuir el requerimiento de medidas de salud y de seguridad ocupacional. Minimizar los riesgos para los trabajadores de las obras de remediación.	Las diferentes técnicas de remediación involucran distintos riesgos para los trabajadores que están a cargo de llevar a cabo estas medidas. Estos riesgos pueden resultar de la exposición de los trabajadores a los contaminantes y también de otras fuentes de riesgo relacionadas con acciones complementarias como obras civiles. <i>Ejemplo:</i> la exposición de trabajadores a la contaminación del sitio puede reducirse en el caso de la aplicación de tratamientos <i>in situ</i> . En cambio, la excavación de suelos contaminados puede implicar exigentes medidas de salud y de seguridad ocupacional para proteger a los trabajadores ante una exposición a la contaminación o de otros riesgos ocupacionales relacionados a las obras de excavación (por ejemplo, el uso de equipo y ropa de protección personal, medidas organizacionales, y constructivas).
6	Opción de realizar acciones complementarias (después de la remediación)	Posibilidad plena de ejecutar acciones complementarias después de la remediación.	El propósito de este criterio es mantener la posibilidad de realizar acciones complementarias de remediación cuando se haya concluido con las medidas de remediación planteadas. <i>Ejemplo:</i> después del confinamiento <i>in situ</i> de los suelos contaminados el área remediada queda accesible para una futura ejecución de medidas de descontaminación.

Tabla 14. Factores y metas para el análisis de sostenibilidad de las alternativas de remediación

N.º	Factor	Meta	Comentario / ejemplos
1	Necesidad de seguimiento de las medidas de remediación	Disminuir al mínimo la necesidad de seguimiento de las medidas de remediación.	Se evalúan las medidas necesarias para mantener el funcionamiento adecuado de las medidas de remediación. Se considera positivo disminuir los requerimientos de mantenimiento. <i>Ejemplo:</i> el confinamiento de suelos contaminados / residuos requiere usualmente de múltiples medidas de seguimiento, como mantenimiento del drenaje y control continuo de las aguas pluviales (en zonas de lluvia), mantenimiento y reparación del confinamiento (geomembrana, capas de arcilla y drenajes, etc.), mantenimiento de la capa superficial del suelo (<i>topsoil</i>) y de la cobertura vegetal, etc.
2	Capacidad de vigilancia / monitoreo del sitio remediado (de ser necesario)	Conservar la mayor capacidad de vigilancia / monitoreo del sitio remediado.	Este criterio solo se aplica en sitios asegurados, o sitios descontaminados en los que todavía existe contaminación residual. Después de la remediación, el sitio está en un estado que permita la ejecución de acciones de vigilancia o de monitoreo. <i>Ejemplo:</i> después de la remediación siguen funcionando pozos que permiten el monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas.
3	Duración de las medidas respecto a la alternativa más eficiente	Disminuir al mínimo la duración de las medidas de remediación respecto a la alternativa más eficiente.	Se consideran aquellas alternativas de remediación más sostenibles cuya ejecución sea más corta. <i>Ejemplo:</i> elección entre bombeo y tratamiento de aguas subterráneas contaminadas y excavación de suelos contaminados en la zona saturada (= remediación de la fuente); el bombeo y tratamiento tiene una duración mucho mayor que la remoción de la fuente de contaminación por excavación. Sin embargo, otros factores (por ejemplo, los impactos para el entorno) pueden favorecer el tratamiento más largo.

Elaboración propia.

En general, las medidas de seguimiento abarcan tres aspectos:

- ◆ La operación, es decir, las intervenciones de control; por ejemplo, ajustar el caudal de pozos en una planta de tratamiento de aguas subterráneas contaminadas.
- ◆ El mantenimiento, es decir, medidas para mantener el funcionamiento de las operaciones de remediación; por ejemplo, limpieza de pozos de lodos, cambio de filtros de carbono activado en una planta de trata-

miento de aguas subterráneas.

- ◆ Las reparaciones, es decir, las obras que se necesitan para reestablecer el funcionamiento de las medidas de aseguramiento en el caso de fallas o defectos. Las reparaciones se aplican tanto a las medidas de aseguramiento activas (por ejemplo, plantas de bombeo y tratamiento) como a las medidas pasivas (por ejemplo, cubrimiento de suelos contaminados). La posibilidad de fallas o defectos, y sus respectivas solucio-

nes, se consideran en la planificación de las medidas de remediación.

Para cada una de las alternativas de remediación se evalúa su sostenibilidad considerando los factores y las metas que se muestran en la tabla 14.

4.4.3. COSTO-EFECTIVIDAD

De acuerdo con las metodologías más empleadas⁵⁷, un análisis de costo-efectividad es una evaluación de alternativas en función de su costo y sus efectos respecto a algún resultado/beneficio esperado. En este análisis, solo se pueden comparar alternativas con el mismo propósito y se requiere una medida común de efectividad (no monetizada). Por tanto, únicamente permite observar si la alternativa A es más costo-efectiva que otra alternativa B para igual resultado o impacto (Mejía, 2012).

Para el análisis de alternativas de remediación significa que solo se pueden comparar alternativas que tienen los mismos objetivos de remediación. Considerando que dos o más alternativas son equivalentes con respecto a lograr los objetivos buscados, se pueden estimar y comparar los costos para cada una de ellas. Este análisis permite determinar la o las alternativa(s) más económica(s).

A continuación, se dan ejemplos de criterios para la evaluación costo-efectividad de las alternativas de remediación:

- ◆ Costo de la técnica de remediación.
- ◆ Costo de la técnica respecto a la ubicación (por ej. costa es diferente que selva).
- ◆ Uso de recursos (como la energía y el agua).
- ◆ Uso de facilidades.
- ◆ Uso de maquinaria o mano de obra.

En este contexto se considera que los costos de la remediación no son un criterio que influye en la aprobación del PdR.

4.4.4. FACTORES DE ECOEFICIENCIA

La remediación de un sitio contaminado involucra usualmente impactos ambientales, como la generación de residuos (por ejemplo, suelos contaminados excavados o lodos del tratamiento de aguas subterráneas contaminadas), el consumo de energía (por ejemplo, obras civiles u operación de plantas de tratamiento) o de recursos naturales como el agua (por ejemplo, para el lavado de suelos) o los suelos (por ejemplo, para el relleno de zanjas que resultan de la excavación de suelos contaminados)

Por este motivo, el análisis de las alternativas de remediación incluyen una evaluación de los factores de ecoeficiencia de las distintas opciones de remediación. En este contexto, se consideran favorables las alternativas que consumen pocos recursos naturales o energía, o que reaprovechan al máximo los residuos generados; por ejemplo, por el reúso de suelos ligeramente contaminados como material de préstamo en el remodelamiento del terreno del sitio, etc.

En la tabla 15 se presentan los factores y las metas a analizar respecto al criterio de ecoeficiencia de las diferentes alternativas de remediación.

4.4.5. RESULTADOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO Y/O ENSAYOS PILOTO

Pueden existir límites a los conocimientos sobre la contaminación en un sitio, sobre todo en sitios complejos, inclusive después de una cuidadosa evaluación de este. Los factores que influyen a los contaminantes y su comportamiento en el ambiente pueden ser numerosos y, asimismo, los costos de la remediación, muy altos.

Ante estas condiciones, resulta difícil lograr con métodos teóricos una seguridad de planificación satisfactoria. Esto incluye que al elaborar el PdR puede mantenerse una gran incertidumbre respecto a la probabilidad de alcanzar los objetivos de remediación plantea-

57. Por ejemplo, la del Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

TABLA 15. Factores y metas para el análisis de la ecoeficiencia de las alternativas de remediación

N.º	Factor	Meta	Comentario / ejemplos
1	Generación y eliminación de residuos (durante la remediación)	Disminuir la generación y la necesidad de eliminar residuos; en este caso no se cuentan como residuos los suelos o los materiales redepositados en el sitio; criterio relativo en comparación con las otras técnicas.	<p>Las alternativas de remediación que generan menos residuos se consideran favorables frente a aquellas que producen gran cantidad de residuos. Los residuos generados requieren usualmente un tratamiento o deben ser dispuestos de forma adecuada. Esto puede involucrar el consumo de recursos naturales o de energía, o el consumo de tierras en el caso de la disposición.</p> <p><i>Ejemplo:</i> los tratamientos <i>in situ</i> de suelos contaminados generan usualmente pequeñas cantidades de residuos, mientras que la excavación de suelos contaminados produce grandes volúmenes de residuos, los cuales pueden calificarse incluso como residuos peligrosos que requieren un manejo y una disposición especiales.</p>
2	Aprovechamiento de residuos (durante la remediación)	Maximizar el aprovechamiento de residuos; en este caso no se cuenta como residuos los suelos o los materiales redepositados en el sitio.	<p>Las alternativas que buscan reaprovechar los residuos generados se consideran favorables.</p> <p><i>Ejemplo:</i> una gestión integral de los residuos que se generan durante la demolición de instalaciones o la excavación de suelos (separación de los suelos de acuerdo con su grado de contaminación) puede disminuir la cantidad de residuos que requieren tratamiento o disposición, y aumentar así aquella que puede ser reaprovechada como material de préstamo en el sitio o fuera de este.</p>
3	Consumo de energía	Disminuir el consumo de energía; criterio relativo en comparación con las otras técnicas.	<p>Las alternativas de remediación que consumen mucha energía se consideran desfavorables.</p> <p><i>Ejemplo:</i> la operación de plantas de tratamiento de aguas subterráneas puede requerir gran cantidad de energía, por ejemplo, para el bombeo del agua, la reactivación del carbono activado, etc., sobre todo en PdR de larga duración. En estos casos, alternativas de remediación que eliminan la contaminación en plazos más cortos pueden ser más favorables en el aspecto energético.</p>
4	Generación de gases de efecto invernadero, como dióxido de carbono y metano	Disminuir la generación de gases de efecto invernadero.	<p>Las alternativas de remediación que generan grandes cantidades de gases de efecto invernadero se consideran desfavorables. La generación de dióxido de carbono puede relacionarse con el consumo de energía de fuentes fósiles.</p> <p><i>Ejemplo:</i> plantas de tratamiento que utilizan fuentes de energía renovables (por ejemplo, mediante paneles solares).</p>

N.º	Factor	Meta	Comentario / ejemplos
5	Consumo de recursos naturales: por ejemplo, agua o suelo	Disminuir el consumo de recursos naturales.	Las alternativas de remediación que requieren de grandes cantidades de recursos naturales (suelo, agua) se consideran desfavorables. <i>Ejemplo:</i> la excavación profunda de suelos contaminados requiere posteriormente el rellenado de la zanja de excavación con suelos no contaminados. Estos suelos (por ejemplo, gravas y arenas de canteras) son recursos naturales cuyo consumo debe ser minimizado.

Elaboración propia

dos, los costos y la duración de la remediación.

Una medida idónea para elaborar soluciones técnicas viables es el desarrollo de ensayos que permitan optimizar la técnica de remediación y garanticen el funcionamiento de esta. Por razones económicas, estos ensayos se realizan usualmente en tres fases: pruebas de laboratorio, ensayos piloto de pequeña escala y ensayos piloto de gran escala.

Fase 1. Pruebas de laboratorio

Las pruebas de laboratorio se efectúan con diferentes fines como los siguientes (entre otros):

- ◆ Determinar las bases técnico-científicas de un método.
- ◆ Evaluar la aplicabilidad de una técnica.
- ◆ Determinar los parámetros de una aplicación óptima de la técnica.

Estas pruebas generan usualmente costos menores que los ensayos piloto; sin embargo, no siempre permiten afirmar la eficacia de una técnica a escala de campo.

Fase 2. Ensayos piloto de pequeña escala

En esta fase se reproduce o imita la técnica de remediación en una escala pequeña, considerando todos los pasos y los procesos que la caracterizan. Este tipo de ensayos suele permitir la determinación de la factibilidad de alcanzar los objetivos de remediación. En el caso de ensayos

piloto con suelos se utilizan por lo general cantidades en un orden de magnitud de kilogramos o pocas toneladas. Los costos de los ensayos piloto de pequeña escala superan comúnmente aquellos de las pruebas de laboratorio.

Fase 3. Ensayos piloto de gran escala

Después de la primera fase, la cual permite identificar las posibles técnicas de remediación, y la segunda, que ayuda a delimitar las disposiciones técnicas, se realizan comúnmente ensayos piloto de gran escala. Estos se efectúan para comprobar definitivamente la factibilidad y la viabilidad de la técnica de remediación en un caso concreto. Además, permiten evaluar problemas en la ejecución de la remediación.

En el caso de ensayos con suelos por lo general se utilizan varias toneladas o varios cientos de toneladas de material de prueba. En el caso de tratamientos *in situ* los ensayos se realizan en suelos no perturbados.

Considerando los altos costos y los largos tiempos de los ensayos piloto de gran escala, estos se aplican usualmente solo en sitios grandes o complejos.

Los ensayos piloto se integran en el plan dirigido a la remediación de tal forma que el ensayo sea parte de la remediación del sitio, en caso hubiese sido exitoso.

Los resultados de las pruebas de laboratorio o de los ensayos piloto se consideran en el análisis de las alternativas de remediación, en caso corresponda.

4.5. Planificación detallada de la propuesta de remediación

Con base en el análisis de alternativas, se determina la propuesta de remediación, es decir, se proponen las medidas que resultan más idóneas y apropiadas para la remediación del sitio contaminado.

Para esta propuesta de remediación se elabora un planeamiento detallado que forma parte integral del PdR. El grado de detalle debe llegar al nivel de factibilidad. La planificación de la ejecución de las medidas propuestas (por ejemplo, expedientes técnicos de obras civiles, diseño detallado de plantas de tratamiento, etc.) se realiza con posterioridad a la aprobación del PdR.

A continuación se presentan los elementos principales que son incluidos en el planeamiento detallado. Más información al respecto se presenta en el anexo 4. El alcance de esta actividad depende de las medidas específicas de cada PdR, por lo que no siempre es necesario elaborar todos los elementos que se presentan en ese anexo.

El planeamiento detallado de las medidas se presenta de forma textual y gráfica (planos, mapas, etc.).

4.5.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LAS MEDIDAS DE REMEDIACIÓN

En el PdR se establecen los objetivos específicos de las medidas de remediación. En el caso que se apliquen combinaciones de técnicas, se definen objetivos para cada una de ellas. Asimismo, se plantean objetivos específicos para cada componente ambiental, si la remediación incluyese diferentes medios ambientales (suelo, aguas subterráneas, sedimentos, etc.).

Los objetivos específicos de la remediación deben ser claros y verificables, definiendo cuándo, cómo y dónde se verifica su cumplimiento.

En general, los objetivos son aplicados en los componentes ambientales afectados (*in situ*), por ejemplo, definir concentraciones límite para contaminantes en el suelo del sitio o en las

aguas subterráneas, y verificar su cumplimiento a través de la toma *in situ* de muestras de suelo o de muestras de aguas subterráneas a través de pozos o piezómetros. También se definen objetivos específicos para el tratamiento *ex situ* de medios ambientales. Esto se aplica, por ejemplo, cuando se excavan los suelos contaminados y se tratan en biopilas, o se extraen (bombean) las aguas subterráneas contaminadas y se purifican en plantas de tratamiento, etc.

Cada uno de estos procesos cuenta con objetivos específicos para el tratamiento, los cuales están en función del uso posterior de los medios tratados, en cada caso:

- ◆ En el tratamiento *ex situ* de suelos se pueden definir como objetivos de tratamiento concentraciones de contaminantes que permitan una reposición del suelo tratado en el sitio o su uso externo como material de préstamo.
- ◆ En plantas de tratamiento de aguas subterráneas los objetivos del tratamiento dependen del lugar en el cual se descarguen las aguas tratadas (por ejemplo, infiltración al acuífero o vertimiento a un cuerpo de agua superficial). En este caso, el agua cuenta con los criterios de calidad para vertimientos de acuerdo con la normativa vigente o, a falta de ello, con criterios establecidos por la autoridad competente.

4.5.2. DESCRIPCIÓN DE LAS MEDIDAS DE REMEDIACIÓN

El PdR incluye una descripción detallada de las medidas de remediación a aplicarse y el sustento técnico que justifica la idoneidad de las medidas planteadas para alcanzar los objetivos de remediación establecidos.

La descripción de las medidas se realizan de forma textual y gráfica. La presentación gráfica se refiere a la ilustración de las medidas en mapas, planos y flujogramas. Dependiendo de las medidas a aplicarse, se presentan flujogramas para las operaciones y los procesos planteados. También se utilizan diagramas que muestren el flujo

de masa de suelos y de otros materiales (medios contaminados, insumos, residuos, etc.), desde su origen hasta su destino final.

En general, la descripción incluyen los siguientes aspectos:

- ◆ Las técnicas y/o los procesos de remediación planteados.
- ◆ El ámbito geográfico de la remediación, incluyendo las áreas donde se aplican las medidas y las áreas de influencia de estas.
- ◆ Los elementos y el procedimiento cronológico de la remediación, considerando:
 - Orden de aplicación de obras civiles, movimiento de masas y labores de demolición de instalaciones o componentes.
 - Almacenamiento temporal de suelos contaminados y de otros residuos (escombros, residuos peligrosos, etc.).
 - Reúso de suelos o de residuos tratados, en el sitio u *off-site*.
 - Disposición *off-site* de suelos contaminados o de residuos.
- ◆ Los cálculos y las especificaciones técnicas, por ejemplo para el diseño de:
 - Plantas de tratamiento *on-site* para suelos contaminados o residuos.
 - Medidas *in situ*.
 - Plantas para la captación y el tratamiento de gases de botaderos o vapores del suelo.
 - Plantas de tratamiento para aguas subterráneas.
- ◆ La estimación de masas de suelos contaminados y de otros residuos (escombros, residuos peligrosos, etc.) para tratamientos *ex situ*.
- ◆ Las especificaciones técnicas de las medidas de aseguramiento y de las medidas de apoyo como:
 - Encapsulado: por ejemplo, con tablestacado o pantallas de baja permeabilidad.

- Confinamientos basales, verticales y de superficies.
- Áreas para el almacenamiento temporal de suelos contaminados, insumos o residuos.
- Otras medidas de soporte: por ejemplo, sistema de drenaje para aguas pluviales en áreas de obras o de almacenamiento, cobertura del área de trabajo bajo una carpa, captación y tratamiento de gases o vapores tóxicos.
- ◆ Los puntos críticos en los cuales se pueden generar emisiones a la atmósfera, descargas de agua contaminada, subproductos y residuos peligrosos y los volúmenes aproximados de generación.
- ◆ Las medidas de salud y de seguridad ocupacional.

4.5.3. CONTENIDOS ADICIONALES

Además de los mencionados, el PdR incluye los siguientes contenidos:

- ◆ Plan de control y de monitoreo en la ejecución
- ◆ Plan de manejo de residuos
- ◆ Propuesta de medidas de seguimiento
- ◆ Plan de muestreo de comprobación
- ◆ Cronograma de ejecución de actividades
- ◆ Estimación de costos
- ◆ Ubicación, caudal y volumen de recurso hídrico a ser utilizado.
- ◆ Ubicación, área y volumen de material de préstamo a ser utilizado.
- ◆ Listado de materiales e insumos a ser utilizados.

Para mayor información sobre estos requerimientos ver anexo 4.

4.6. Comprobación de la remediación

La comprobación de la remediación tiene el propósito de asegurar el cumplimiento de las obligaciones y los compromisos establecidos en el PdR del sitio contaminado. Debe contener los criterios técnicos que permitan comprobar el cumplimiento de los objetivos de remediación establecidos en dicho plan; criterios que son claros y verificables. También es importante destacar que estos criterios están en función del tipo de medidas de remediación (descontaminación o aseguramiento, tipos de técnicas aplicadas) y de la naturaleza de los objetivos de remediación establecidos.

Se puede distinguir entre objetivos que se basan en concentraciones (o cargas) «máximas», como los ECA para suelo, los NdF o los valores establecidos por la ERSA. Este tipo de objetivos se suelen fijar en PdR en los que se requieren medidas de descontaminación.

En cambio, las medidas de aseguramiento comúnmente tienen otro tipo de objetivos, puesto que su finalidad no es eliminar o reducir la concentración de los contaminantes en el sitio, sino asegurar condiciones que no representen un riesgo inaceptable para las personas o para el ambiente: por ejemplo, el confinamiento o encapsulado de la contaminación que evite la liberación de contaminantes al ambiente (ver 4.2.3). En ese sentido, para las actividades de aseguramiento se establecen otro tipo de criterios técnicos que permitan verificar la eficacia de las medidas implementadas con respecto a los objetivos de remediación aceptados.

En el caso de una descontaminación del sitio habitualmente resulta suficiente constatar el cumplimiento de los objetivos de remediación con un muestreo de comprobación en un solo momento, el cual se realiza al final de la remediación. Sin embargo, en algunos casos puede ser necesario realizar ese muestreo durante o

en paralelo con las actividades de remediación. Por ejemplo, en una excavación profunda de suelos contaminados se efectúa el muestreo de comprobación a través de la toma de muestras en los fondos y las paredes de las zanjas de excavación. Debido a razones de seguridad o de logística se suele requerir un rápido relleno de las zanjas después de culminar con la remoción de los suelos contaminados. En excavaciones profundas es necesario, en diferentes lugares del sitio, realizar el muestreo de comprobación durante la remediación, es decir, antes de que culminen las acciones de remediación en otras partes del sitio.

Por otro lado, las actividades de aseguramiento requieren usualmente un monitoreo continuo para comprobar la eficacia de la remediación en el largo plazo. En el caso del confinamiento o el encapsulado de suelos contaminados se puede requerir la verificación periódica del estado físico del confinamiento y el monitoreo de aguas superficiales y/o subterráneas aguas abajo del sitio o del componente asegurado.

Las acciones de comprobación se describen en el «Plan de muestreo de comprobación» que forma parte integral del PdR. Este se realiza conforme a lo establecido en la guía para el muestreo de suelos⁵⁸ (MINAM, 2014).

De acuerdo con la normativa vigente, la entidad de fiscalización ambiental puede realizar acciones de seguimiento y de verificación del cumplimiento de dichos compromisos⁵⁹. Asimismo, las acciones de comprobación y los resultados del muestreo correspondientes son documentados en el «Informe de culminación», de acuerdo con lo establecido⁶⁰.

4.7. Plan dirigido a la remediación

58. Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM

59. Numeral 16.3 del artículo 6 de los Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados, aprobados por el Decreto Supremo N° 012-2017-MINAM

60. Ib., artículo 17.



El PdR se elabora cuando la caracterización de un sitio contaminado determina la necesidad de ejecutar medidas de remediación.

El término *plan dirigido a la remediación* no debe entenderse como un nombre propio, sino que engloba los instrumentos de gestión ambiental que tienen como finalidad remediar un sitio contaminado, es decir, eliminar o reducir a niveles aceptables los riesgos para la salud humana o el ambiente asociados a la contaminación del lugar.

Por ello, el PdR puede tener distintas denominaciones, como plan de recuperación, plan de rehabilitación, plan de remediación, etc., siempre y cuando su finalidad sea la remediación de un sitio contaminado y contenga, como mínimo, los elementos establecidos en la norma vigente⁶¹. Estos elementos mínimos son:

- ◆ Los objetivos de remediación, entendidos

como el grado o el nivel de calidad ambiental que se busca alcanzar. Dependiendo del caso concreto, estos objetivos pueden tener como finalidad el uso posterior del sitio o el restablecimiento de este a un estado similar al presentado antes de ocurrir los impactos ambientales negativos.

- ◆ Propuesta de medidas de remediación (medidas de descontaminación y de aseguramiento), o concepto para la ANM⁶². Las medidas se determinan con base en un análisis de alternativas de remediación.
- ◆ Las medidas de remediación de aguas subterráneas, sedimentos u otros componentes ambientales, en caso corresponda.
- ◆ Otras medidas adicionales que sean necesarias para alcanzar los objetivos de remediación.

61. Ib.

62. Ib., artículo 14.

- ◆ El cronograma de implementación de las medidas propuestas.
- ◆ La información disponible sobre el uso anterior, el uso actual o el que se tenga previsto desarrollar en el sitio contaminado.
- ◆ Un resumen del EC, cuando este haya sido presentado por separado ante la autoridad competente⁶³.

- ◆ Medidas de monitoreo, control y seguimiento.

Para más detalles sobre el contenido del PdR ver anexo 4. Además, el plan puede contener otros elementos en caso que el instrumento de gestión ambiental que engloba el PdR lo requiera.

En términos generales, la fase de elaboración del plan es la consecuencia práctica de las fases anteriores.

63. Ib., artículo 7, numeral 7.3.



Actividades potencialmente contaminantes para el suelo.-

Se consideran actividades potencialmente contaminantes para el suelo aquellos proyectos o actividades antrópicas, cuyo desarrollo implica el uso, manejo, almacenamiento, transporte, producción, emisión o disposición de sustancias químicas, materiales o residuos peligrosos, que son capaces de generar la contaminación del suelo y de los componentes ambientales asociados a este, por su toxicidad, movilidad, persistencia, biodegradabilidad, entre otras características de peligrosidad establecidas en las guías técnicas aprobadas por el Ministerio del Ambiente.

Agua subterránea.- Todas las aguas que se encuentran bajo la superficie del suelo en la zona de saturación y en contacto directo con el suelo o el subsuelo.

Agua subterránea afectada. Aquella agua subterránea cuyas funciones ecosistémicas se encuentran deterioradas o que presenta una calidad que no es apta para su uso por el hombre, como consecuencia de la alteración de sus características naturales por influencia antrópica.

Área de potencial afectación. Es el área adyacente a los lugares en los que se instalarán componentes o se desarrollarán procesos de actividades antrópicas potencialmente contaminantes para el suelo, que han sido identificadas en el marco de la elaboración de la línea base y que a su vez se ubican en el área de influencia directa del proyecto.

Área de potencial interés.- Se trata de áreas identificadas durante la Fase de Identificación en las cuales existen indicios o evidencias de contaminación del suelo, sobre el cual se realizarán las labores de muestreo.

Atenuación natural monitoreada.- Es un enfoque de gestión del sitio contaminado en el que se hace seguimiento a los procesos físicos, químicos y biológicos de degradación natural de los contaminantes, que reducen la masa, toxicidad y/o movilidad de la contaminación en suelos o aguas subterráneas, a niveles aceptables para la salud y el ambiente.

Autoridad competente.- Para efectos de la presente guía, es aquella entidad del gobierno nacional, regional o local con competencias para emitir la certificación ambiental en el marco del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental (SEIA).

Contaminante. Cualquier sustancia química relacionada con actividades antrópicas susceptible de causar efectos nocivos a la salud de las personas o al ambiente.

Contaminante de potencial interés (Cpl). Cualquier sustancia química susceptible de causar efectos nocivos a la salud de las personas o al ambiente, asociada a las actividades antrópicas que se desarrollan o desarrollaron en el sitio bajo estudio. Son aquellas sustancias en las cuales se enfocan el muestreo de identificación y el muestreo de detalle, tras las conclusiones de la evaluación preliminar.

Estándar de calidad ambiental (ECA) para suelo.- Medida que establece el nivel de concentración de elementos, sustancias o parámetros químicos, presentes en el suelo, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Una superación de los parámetros ECA en suelos indica un riesgo potencial para los usos de suelo regulados.

Evaluación de riesgos a la salud y el ambiente (ERSA).- Es el estudio que tiene por objeto determinar si la contaminación en un sitio re-

presenta un riesgo inaceptable para la salud humana o el ambiente. Además, permite establecer Niveles de Remediación específicos para el sitio y determinar las acciones de remediación que resulten necesarias.

Evaluación Preliminar (EP).— Primera etapa de la fase de identificación que comprende la investigación histórica y el levantamiento técnico (inspección) de un sitio potencialmente contaminado. La EP tiene la finalidad de comprobar o descartar sospechas o indicios de contaminación en el sitio, y de identificar potenciales fuentes y focos de contaminación, potenciales rutas/vías de exposición y potenciales receptores (= modelo conceptual inicial del sitio). La EP no incluye la toma de muestras ambientales.

Fase libre. Este término también se denomina «producto libre» y describe la presencia de sustancias no acuosas que se caracterizan por no formar mezclas con el agua o con el suelo. Se utiliza con frecuencia en los casos de contaminación con hidrocarburos que flotan sobre un espejo de agua o son visibles en la superficie del suelo.

Fase líquida no acuosa ligera (LNAPL). Líquido inmiscible en agua de menor densidad que esta y que, por tanto, se presenta flotando sobre el nivel freático en procesos de contaminación de aguas subterráneas.

Fase líquida no acuosa pesada (DNAPL). Líquido inmiscible en agua de mayor densidad que esta y que, por tanto, tiende a hundirse en la zona saturada y a acumularse en la base del acuífero en procesos de contaminación de aguas subterráneas.

Foco de contaminación. Este término se denomina también «fuente secundaria de contaminación» o *hotspot*, y comprende los componentes ambientales afectados por las fuentes primarias de contaminación, que se caracterizan por presentar altas concentraciones de contaminantes y ser potenciales generadores de contaminación en otros componentes ambientales.

Franja capilar. Zona situada inmediatamente por encima del nivel freático en la cual el agua es atraída por fuerzas capilares.

Fuente de contaminación. Se denomina también «fuente primaria de contaminación» y comprende cualquier componente, instalación o proceso de actividades antrópicas que puede liberar contaminantes al medio ambiente.

Indicios de contaminación. Son circunstancias o signos suficientemente acreditados que permiten inferir de forma preliminar la posible existencia de un sitio contaminado.

Juicio de experto. Opinión de un experto, o de un grupo de expertos, sobre algún asunto, entendiéndose como expertos aquellas personas que cuentan con gran experiencia, habilidades técnicas y conocimientos específicos en la materia.

Medidas de aseguramiento.— Son aquellas técnicas de remediación que tienen por objeto evitar la dispersión de los contaminantes a largo plazo o disminuir la exposición de los receptores a niveles que no impliquen riesgos para la salud y el ambiente. Estas medidas pueden contemplar, por ejemplo, el encapsulamiento, confinamiento, sellado, inmovilización, drenaje de gases y barreras hidráulicas o permeables.

Medidas de descontaminación. Comprenden aquellas técnicas de remediación que tienen por objeto eliminar o reducir los contaminantes del sitio hasta alcanzar los ECA para suelo, los niveles de fondo o los niveles establecidos en el estudio de evaluación de riesgos a la salud y el ambiente (ERSA). Esta clase de medidas pueden contemplar técnicas fisicoquímicas (como la excavación de suelo contaminado, extracción del aire del suelo, bombeo y tratamiento de aguas subterráneas, enjuague de suelos y tratamientos químicos *in-situ*), biológicas (como la biodegradación *in-situ*, fitorremediación, *landfarming*, tratamientos *ex-situ*, *on-site* y *off-site* en biopilas y compostaje), térmicas (como la incineración y desorción térmica), entre otras.

Modelo conceptual. Relato escrito y/o representación gráfica del sistema ambiental y de los procesos físicos, químicos y biológicos que determinan el transporte de contaminantes desde las fuentes de contaminación hasta los potenciales receptores, a través de los componentes ambientales que forman parte de dicho sistema.

Muestreo de comprobación. Es aquel muestreo orientado a constatar si se alcanzaron los objetivos de remediación establecidos en el plan dirigido a la remediación aprobado.

Muestreo de Detalle (MD). Es aquel que permite determinar el área y volumen de suelo contaminado, la cantidad y distribución espacial de los contaminantes en el sitio, sus tasas móviles y su posible extensión hacia otros componentes ambientales. El MD se desarrolla en base al modelo conceptual del sitio y su alcance se determina en función a los objetivos de la caracterización del sitio.

Muestreo de Identificación (MI). Es aquel orientado a verificar o descartar la presencia de un sitio contaminado, mediante la toma de muestras del suelo y el análisis de los parámetros relacionados con aquellas sustancias químicas, materiales o residuos peligrosos, vinculados a las actividades potencialmente contaminantes para el suelo que se hayan realizado o realicen en el sitio. El MI puede incluir la toma de muestras de otros componentes ambientales potencialmente afectados, como el agua subterránea.

Nivel freático: Límite superior de la zona saturada en el que el agua se encuentra a presión atmosférica.

Nivel de Fondo. Concentración de origen natural de una o más sustancias químicas presentes en los componentes ambientales, que puede incluir el aporte de fuentes antrópicas no relacionadas al sitio potencialmente contaminado o sitio contaminado.

Nivel de Remediación Específico. Es la concentración de una sustancia química, deter-

minada de manera específica para las condiciones de un sitio contaminado, a través de una evaluación de riesgos a la salud y el ambiente (ERSA).

Plan dirigido a la remediación (PdR). Es un instrumento de gestión ambiental que tiene por finalidad la remediación de sitios contaminados originados por actividades antrópicas pasadas o presentes.

Pluma de contaminación. En general, este término comprende aquella descarga visible o medible de un contaminante partiendo desde un punto de origen. En el caso de las aguas subterráneas, se denomina pluma de contaminación al acuífero que contiene el agua contaminada, que se origina por la infiltración de contaminantes al subsuelo.

Proyecto. Para efectos de la presente guía, se debe entender como proyecto lo establecido en la normativa del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental (SEIA).

Remediación. Este término implica la eliminación o reducción, a niveles aceptables, de los riesgos para la salud de las personas o el ambiente asociados a la contaminación del sitio. Además comprende las acciones que permitan lograr el uso posterior del sitio o el restablecimiento del mismo a un estado similar al presentado antes de ocurrir los impactos ambientales negativos.

Riesgo. Probabilidad o posibilidad de que un contaminante ocasione efectos adversos a la salud humana en los organismos que constituyen los ecosistemas o en la calidad de los suelos y del agua, en función de las características y de la cantidad que entra en contacto con los receptores potenciales, incluyendo la consideración de la magnitud o la intensidad de los efectos asociados y el número de individuos, ecosistemas o bienes que, como consecuencia de la presencia del contaminante, podrían ser afectados tanto en el presente como en escenarios futuros dentro del uso actual o previsto del sitio

Riesgo potencial. Riesgo que puede suceder pero cuya existencia aún no ha sido comprobada.

Sedimentos. Material no consolidado depositado por procesos fluviales o marinos recientes, y que se encuentra permanente o temporalmente por debajo del espejo de aguas superficiales.

Sitio contaminado.- Área en la cual el suelo contiene contaminantes provenientes de actividades antrópicas, en concentraciones que pueden representar riesgos para la salud o el ambiente, debido a que superan los estándares de calidad ambiental (ECA) para suelo, estándares internacionales aprobados por el MINAM o los niveles de fondo, siempre que estos últimos presenten valores que excedan dichos estándares. El área identificada como sitio contaminado puede comprender el agua subterránea subyacente, los sedimentos u otros componentes ambientales que resulten afectados por la contaminación del suelo, cuando se encuentren dentro de esta.

Sitio potencialmente contaminado. Área en la cual el suelo puede contener contaminantes provenientes de actividades antrópicas. El sitio potencialmente contaminado puede comprender el agua subterránea subyacente, los sedimentos u otros componentes am-

bientales cuando estos resulten afectados por la presunta contaminación del suelo.

Suelo. Material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos que comprende desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad.

Sustancias peligrosas. Son aquellas sustancias o mezclas definidas en el Reglamento Nacional de Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos, aprobado por Decreto Supremo N° 021-2008-MTC y el Libro Naranja de las Naciones Unidas.

Tasa móvil. Es la fracción de una sustancia contaminante en el suelo que puede ser movilizad a través de lixiviados, aguas subterráneas o la fase gaseosa del suelo. La tasa móvil es un factor importante para determinar el potencial de migración del contaminante en el ambiente.

Zona no saturada (zona vadosa). Parte del suelo situada por encima del nivel freático en la que los huecos se encuentran ocupados por líquidos (normalmente agua) o gases (normalmente aire) a presión atmosférica.

Zona saturada. Parte del suelo situada por debajo del nivel freático en la que los huecos se encuentran ocupados por líquidos (normalmente agua).

Bibliografía

Referencias citadas

Autoridad Regional Ambiental de Arequipa (ARMA). (2014). *Evaluación de riesgos para la salud y el ambiente en la población de Mollehuaca / Arequipa*. Arequipa: Cooperación Alemana / ARMA / MINAM.

Adler, P. S. & Kranowitz, J. L. (2005). *A Primer on Perceptions of Risk, Risk Communication and Building Trust*. Keystone, CO: National Energy Technology Laboratory (NETL) / The Keystone Center.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2006). *ASTM D5314-92 (2006). Standard Guide for Soil Gas Monitoring in the Vadose Zone*. West Conshohocken, PA: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2010). *ASTM D6345-10. Standard Guide for Selection of Methods for Active, Integrative Sampling of Volatile Organic Compounds in Air*. West Conshohocken, PA: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2012a). *ASTM D7648-12. Standard Practice for Active Soil Gas Sampling for Direct Push or Manual-Driven Hand-Sampling Equipment*. West Conshohocken, PA: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2012b). *ASTM D7352-07 (2012). Standard Practice for Direct Push Technology for Volatile Contaminant Logging with the Membrane Interface Probe (MIP)*. West Conshohocken, PA: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2014a). *ASTM E1689-95. Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites*. West Conshohocken, PA: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2014b). *ASTM D7297-14. Standard Practice for Evaluating Residential Indoor Air Quality Concerns*. West Conshohocken, PA: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2017). *ASTM D6306-17. Standard Guide for Placement and Use of Diffusive Samplers for Gaseous Pollutants in Indoor Air*. West Conshohocken, PA: ASTM.

Arbeitskreis Grundwasserbeobachtung (AKGW). (2012). *Merkblatt Bau von Grundwassermessstellen. Handbuch Grundwasserbeobachtung*. Berlín: Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg / Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg / Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt / Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt / Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin / Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie / Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ Leipzig-Halle.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (BIfU). (2016). *Historische Erkundung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen*. Merkblatt Nr. 3.8/7. Munich: BIfU.

Bell, L. (2016). *Guía para la identificación, la gestión y la rehabilitación de sitios contaminados con mercurio*. Estocolmo: IPEN.

Bihler, M., Koch, M., Mücke, W. & Weindl, J. (2001). *Kursbuch Altlasten. Recht, Toxikologie und Technik*. Taschenbuch – 6. Munich: Franz Vahlen.

Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (2016a). *Guidance Manual for Environmental Site Characterization in Support of Environmental and Human Health Risk Assessment. Volume 1. Guidance Manual*. Ottawa: CCME.

Carlton, C. (ed.). (2007). *Derivation Methods of Soil Screening Values in Europe. A Review and*

Evaluation of National Procedures towards Harmonization. Luxemburgo: Joint Research Centre, European Commission / Ispra,

Estados Unidos Mexicanos, Secretaría de Econo-

- mía. [2006]. *NMX-AA-132-SCFI-2006. Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra*. México, D. F.: Secretaría de Economía.
- Huntley, D. & Beckett, G. D. [2002]. Persistence of LNAPL sources: Relationship between risk reduction and LNAPL recovery. *Journal of Contaminant Hydrogeology*, 59(1-2), 3-26.
- Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC). [2009]. *Evaluating LNAPL Remedial Technologies for achieving Project Goals*. Guidance Document. Washington, D. C.: Risk Assessment Team, ITRC.
- Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC). [2015]. *Decision making at Contaminated Sites. Issues and Options in Human Health Risk Assessment*. RISK-3. Washington, D. C.: Risk Assessment Team, ITRC.
- Kaifer Brasero, M^a de J., Aguilar Peña, A., Alonso Martínez, M^a. del P., Caleyá Sánchez, J. M., Villarrubia Duner, M., Van Leewe, F. & Vos, M. [2004]. *Guía de Investigación de la Calidad del Suelo*. Plan regional de actuaciones en materia de suelos contaminados de la Comunidad de Madrid 2001-2006. Madrid: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Comunidad de Madrid.
- Mejía, F. [2012]. *Una introducción al análisis económico. Costo efectividad y costo beneficio* [PPT]. Taller Internacional de Encuestas y Evaluación de Impacto de Políticas Públicas. Santiago de Chile.
- Marker, A. [2012]. *Módulo de capacitación "Gestión de Sitios Contaminados"*. Diplomado Internacional de Especialización Avanzada en Gestión y Tecnologías Ambientales. Lima: Servicio Nacional de Adiestramiento en Trabajo Industrial (Senati).
- Marker, A. [2015]. *Manual de Lineamientos y Procedimientos para la elaboración y evaluación de «Informes de Identificación de Sitios Contaminados» según D. S. N° 002-2013-MINAM y D. S. N° 002-2014-MINAM*. Lima: MINAM / Cooperación Alemana implementada por la Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).
- Ministerio del Ambiente (MINAM). [2014]. *Guía para el Muestreo de Suelos*. Publicado mediante Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM. Lima: MINAM.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). [2015]. *Guía para la elaboración de estudios de Evaluación de Riesgos a la Salud y el Ambiente (ERSA) en sitios contaminados*. Publicado mediante Resolución Ministerial N° 034-2015-MINAM. Lima: Dirección General de Calidad Ambiental, MINAM.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). [2016a]. *Manual de buenas prácticas en la investigación de sitios contaminados: muestreo de suelo*. Lima: MINAM / Cooperación Alemana implementada por la GIZ.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). [2016b]. *Manual de buenas prácticas en la investigación de sitios contaminados: muestreo de aguas subterráneas*. Lima: MINAM / Cooperación Alemana implementada por la GIZ.
- Ministerio del Ambiente / Autoridad Regional Ambiental de Arequipa (ARMA) / Municipalidad Distrital de Chala. [2016]. *Evaluación preliminar de la contaminación ambiental causada por la pequeña minería y minería artesanal en la zona urbana del distrito de Chala. Informe final*. Lima / Arequipa: MINAM.
- Newell, C. J., Acree, S. D., Ross, R. R. & Huling, S. G. [1995]. Light nonaqueous phase liquids. *Ground Water Issue*. EPA/540/S-95/500. Washington, D. C.: US EPA.
- Rivett, M. O. (ed.), Tomlinson, D., Thornton, S., Thomas, A., Leharne, S. & Wealthall, G. [2014]. *An Illustrated Handbook of LNAPL Transport and Fate in the Subsurface*. Londres: CL:AIRE Leading Sustainable Land Reuse.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). [1988]. *Seven Cardinal Rules of Risk Communication*. OPA-87-020. Washington, D. C.: US EPA.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). [1996]. *Soil Screening Guidance: User's Guide* (2.^a ed.). EPA/540/R-96/018. Washington, D. C.: US EPA.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2000). *Conceptual Site Model (Part I)*. RCRA Corrective Action Workshop on Results-Based Project Management. Washington, D. C.: US EPA.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2002a). *Guidance on Choosing a Sampling Design for Environmental Data Collection for use in Developing a Quality Assurance Project Plan*. EPA/240/R-02/009. Washington, D. C.: US EPA.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2002b). *Guidance for Comparing Background and Chemical Concentrations in Soil for CERCLA Sites*. EPA 540-R-01-003 OSWER 9285.7-41. Washington, D. C.: US EPA.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2006). *Guidance on Systematic Planning Using the Data Quality Objectives Process*. EPA QA/G-4. EPA/240/B-06/001. Washington, D. C.: US EPA.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2007a). *Risk Communication in Action, the Risk Communication Handbook*. EPA 625/R-05/003. Washington, D. C.: US EPA.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2012). *Petroleum Hydrocarbons and Chlorinated Hydrocarbons Differ in their Potential for Vapor Intrusion*. Washington, D. C.: US EPA.

Verein Deutscher Ingenieure (VDI). (1998a). *VDI-Richtlinie 3865: Part 2. Measurement of Organic Soil Pollutants: Techniques of Active Sampling of Soil Gas*. Berlín: VDI.

Verein Deutscher Ingenieure (VDI). (2005). *VDI-Richtlinie 3865: Part 1. Measurement of Organic Soil Pollutants: Planning of Measurements for the Determination of Volatile Organic Compounds in Soil Gas*. Berlín: VDI.

Wabbles, D., Teusch, G. & der Themenverbund 1 (TV1) „Raffinieren, Tanklager, Kraftstoffe/Mineralöl, MTBE“. (2008). *Leitfaden. Natürliche Schadstoffminderungs Prozesse bei mineralöl kontaminierten Standorten; Methoden, Empfehlungen und Hinweise zur Un-*

tersuchung und Beurteilung. Tubinga: Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden (KORA) / Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF).

Lecturas recomendadas

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2011). *ASTM E1903-11. Standard Practice for Environmental Site Assessments: Phase II Environmental Site Assessment Process*. West Conshohocken, PA: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2013). *ASTM E1527-13. Standard Practice for Environmental Site Assessments: Phase I Environmental Site Assessment Process*. West Conshohocken, PA: ASTM.

Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (2016b). *Guidance Manual for Environmental Site Characterization in Support of Environmental and Human Health Risk Assessment. Volume 4. Analytical Methods*. Ottawa: CCME.

Dreschmann, P. (2000). *Arbeitshilfe. Anforderungen an eine Sanierungsuntersuchung unter Berücksichtigung von Nutzen-Kosten-Aspekten*. Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz (MALBO), Band 11. Essen: Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA NRW).

Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (Indecopi). (1999a). *Norma Técnica Peruana NTP 339.134 1999. SUELOS. Método para la clasificación de suelos con propósitos de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS)*. Lima: Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales, Indecopi.

Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (Indecopi). (1999b). *SUELOS. Símbolos, unidades, terminologías y definiciones*. Lima: Comisión de Reglamentos Técnicos y

Comerciales, Indecopi.

Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (Indecopi). (2001a). *Norma Técnica Peruana NTP 339.150 2001. SUELOS. Descripción e identificación de suelos. Procedimiento visual-manual*. Lima: Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales, Indecopi.

Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (Indecopi). (2001b). *Norma Técnica Peruana NTP 339.136 2001. SUELOS. Guía normalizada para caracterización de campo con fines de diseño de ingeniería y construcción*. Lima: Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales, Indecopi.

Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (Indecopi). (2001c). *Norma Técnica Peruana NTP 339.151 2001. SUELOS. Prácticas normalizadas para la preservación y transporte de suelos*. Lima: Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales, Indecopi.

Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (Indecopi). (2001d). *Norma Técnica Peruana NTP 339.161 2001. SUELOS. Práctica para la investigación y muestreo de suelos con perforaciones con barrena*. Lima: Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales, Indecopi.

Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (Indecopi). (2002). *Norma Técnica Peruana NTP 339.169 2002. SUELOS. Muestreo geotécnico de suelos con tubo de pared delgada*. Lima: Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales, Indecopi.

Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (Indecopi). (2003). *Norma Técnica Peruana NTP 339.252 2003. SUELOS. Guía estándar para muestreo de suelos de la zona vadosa (zona no saturada por encima del nivel freático)*. Lima: Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales, Indecopi.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2002c). *Guidance for Quality Assurance Project Plans*. EPA/240/R-02/009. Washington, D. C.: US EPA.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2002d). *Guidance on Choosing a Sampling Design for Environmental Data Collection for Use in Developing a Quality Assurance Project Plan*. EPA QA/G-5S. Washington, D. C.: US EPA.

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2007b). *Effective Risk and Crisis Communication during Water Security Emergencies*. EPA/600/R-07/027. Washington, D. C.: US EPA.

Verein Deutscher Ingenieure (VDI). (1998b). *VDI-Richtlinie 3865: Part 3. Measurement of Organic Soil Pollutants. Gaschromatographic determination of Volatile Organic Compounds in Soil Gas; Adsorption on activated Charcoal and Desorption with Organic Solvent*. Berlín: VDI.

Verein Deutscher Ingenieure (VDI). (2000). *VDI-Richtlinie 3865: Part 4. Measurement of Organic Soil Pollutants. Gaschromatographic determination of Volatile Organic Compounds in Soil Gas; Direct Measurement*. Berlín: VDI.

Portales electrónicos

www.claire.co.uk

www.epa.gov

www.ipen.org

www.itrcweb.org

www.lanuv.nrw.de

www.gob.pe/minam

www.natural-attenuation.de

Abreviaciones

AKGW	Arbeitskreis Grundwasserbeobachtung (Grupo de Trabajo para la observación del agua subterránea de Alemania)
ANM	Atenuación natural monitoreada
Apl	Área de potencial interés
ARMA	Autoridad Regional Ambiental de Arequipa
As	Arsénico
ASTM	American Society for Testing and Materials
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BTEX	Suma de benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos
°C	Grados centígrados
CCME	Canadian Council of Ministres of the Environment
CME	Concentración máxima encontrada
COP	Contaminante orgánico persistente
COV	Compuesto orgánico volátil
Cpl	Contaminante de potencial interés
DNAPL	Dense Non-Aqueous Phase Liquid (Fase líquida no acuosa pesada)
DRP	Diferencia relativa porcentual
EC	Estudio de caracterización
ECA	Estándar(es) de calidad ambiental
EP	Evaluación preliminar
ERSA	Evaluación de riesgos a la salud y el ambiente
GC-MS	Cromatografía de gases o espectrometría de masa (<i>Gas chromatography – Mass spectrometry</i>)
HAP	Hidrocarburo aromático policíclico
HSE	Health, Safety & Environment (salud, seguridad y ambiente)
IISC	Informe de identificación de sitios contaminados
Inacal	Instituto Nacional de Calidad
IPEN	International POPs Elimination Network (Red Internacional de Eliminación de los Contaminantes Orgánicos Persistentes)
ITRC	Interstate Technology & Regulatory Council

KORA	Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden (atenuación natural en la remediación de aguas subterráneas y suelos contaminados)
LC	Límite de cuantificación
LNAPL	Light non-aqueous phase liquid (fase líquida no acuosa ligera)
MCS	Modelo conceptual del sitio
MD	Muestreo de detalle
MI	Muestreo de identificación
MINAM	Ministerio del Ambiente
MIP	Membrane Interface Probe (sondas con membrana de interfaz)
m.s. n. m.	Metros sobre el nivel del mar
NdF	Nivel de fondo
NTP	Norma Técnica Peruana
ONGD	Organización no gubernamental de desarrollo
PACal	Plan de aseguramiento de la calidad
Pb	Plomo
PCE	Percloroetileno (= tetracloroetileno)
PCB	Bifenilos policlorados
PdR	Plan dirigido a la remediación
pH	Índice de acidez
PID	Photo-Ionization Detector (detector de fotoionización)
PM	Particulate Matter (material particulado)
PVC	Policloruro de vinilo
Respel	Residuos peligrosos
SEIA	Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental
TCE	Tricloroetileno
US EPA	United States Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos)
VDI	Verband Deutscher Ingenieure (Asociación de Ingenieros de Alemania)

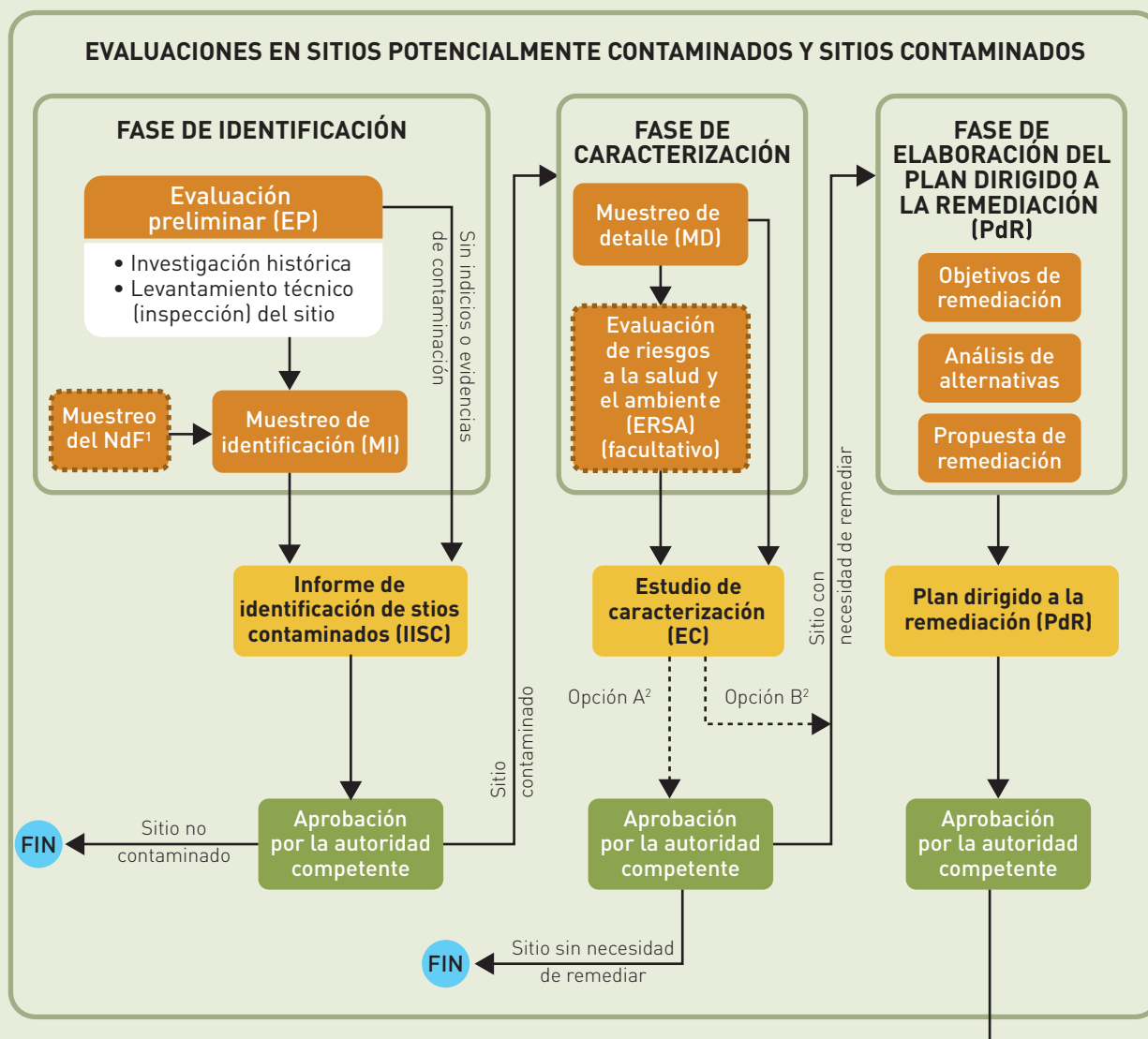
Anexos

- Anexo 1. Gestión de sitios potencialmente contaminados y sitios contaminados: procedimiento como flujograma

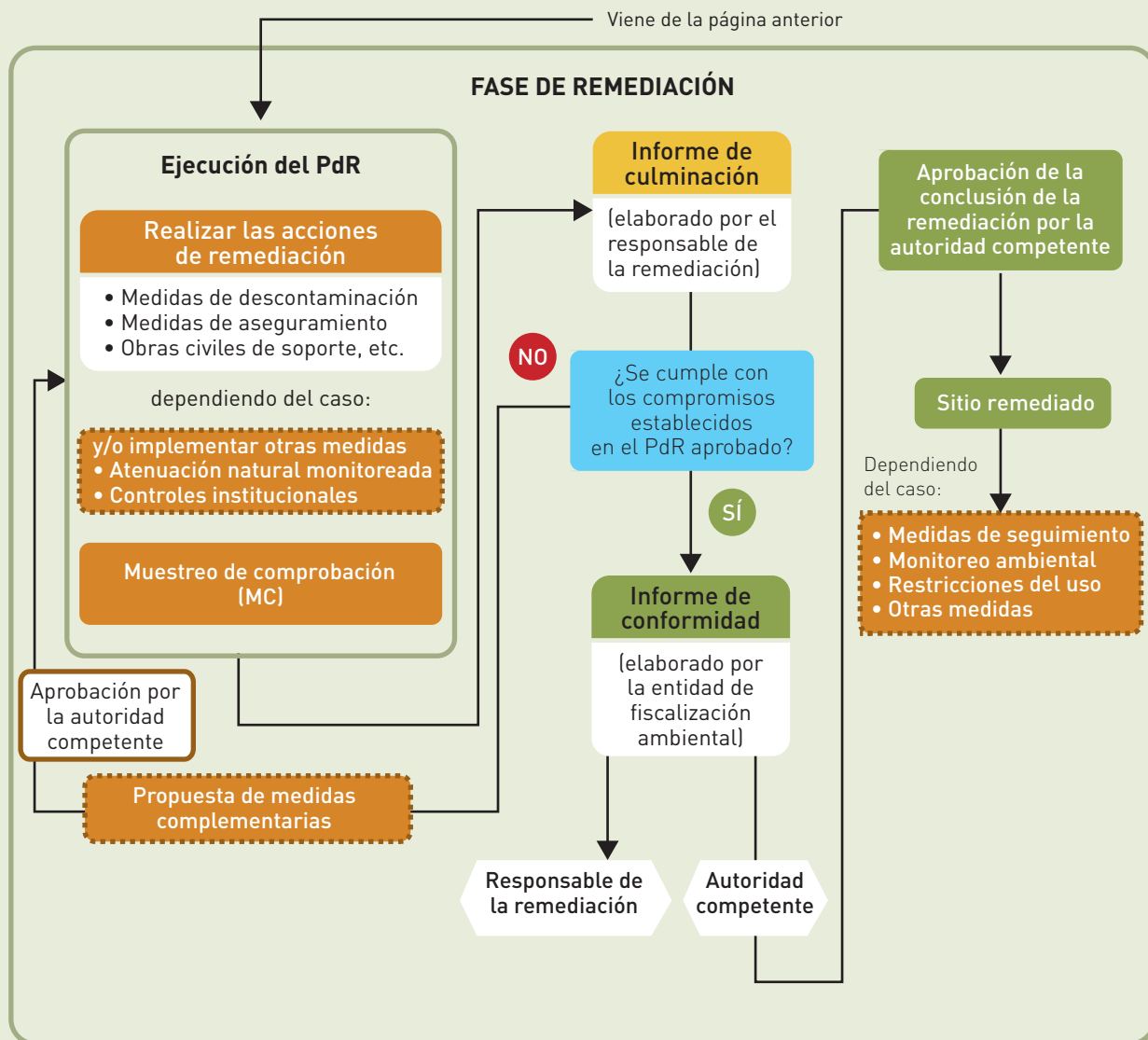
- Anexo 2. Informe de identificación de sitios contaminados (IISC): estructura y descripción del contenido
- Anexo 3. Estudio de caracterización (EC): estructura y descripción del contenido
- Anexo 4. Plan dirigido a la remediación (PdR): estructura y descripción del contenido
- Anexo 5. Cuestionario para el levantamiento técnico (inspección) del sitio: formato
- Anexo 6. Elementos orientadores para la evaluación preliminar
- Anexo 7. Modelos conceptuales de sitios contaminados
- Anexo 8. Presentación de los resultados del muestreo: formato
- Anexo 9. Orientaciones para el levantamiento topográfico
- Anexo 10. Matriz para el análisis de alternativas de remediación

ANEXO 1

Flujograma general para la gestión de sitios potencialmente contaminados y sitios contaminados



Continúa en la siguiente página



1. Niveles de fondo

2. La presentación del estudio de caracterización puede realizarse por separado (opción A) o como parte del plan dirigido a la remediación (opción B), para su respectiva aprobación por la autoridad competente.

ANEXO 2

Informe de identificación de sitios contaminados (IISC): estructura y descripción del contenido

ESTRUCTURA DEL IISC

Resumen ejecutivo

1. Datos generales

- 1.1. Nombre y/o razón social (de quien presenta el IISC)
- 1.2. Nombre y firma del representante legal (en su caso)
- 1.3. Domicilio para recibir notificaciones
- 1.4. Datos de las empresas que intervinieron en la elaboración

2. Objetivos y alcances

3. Evaluación preliminar

- 3.1. Información general (actual e histórica)
- 3.2. Características naturales
- 3.3. Historial de los usos
- 3.4. Identificación de potenciales fuentes y focos de contaminación
- 3.5. Modelo conceptual del sitio (preliminar)
- 3.6. Determinación del área de potencial interés (Apl)"

4. Muestreo de identificación (MI)

- 4.1. Objetivos específicos
- 4.2. Descripción de las actividades de muestreo realizadas
- 4.3. Presentación y evaluación de los resultados

5. Modelo conceptual del sitio (inicial)

6. Conclusiones y recomendaciones

7. Anexos

/ 138

DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO DEL IISC

RESUMEN EJECUTIVO

Breve descripción de los trabajos realizados, de los hallazgos y resultados principales, y de las conclusiones claves del estudio.

1. Datos generales

Contiene los datos generales de la(s) persona(s) natural(es) y/o jurídica(s) quienes presentan el IISC y que intervinieron en su elaboración, como:

- ◆ Nombre y/o razón social (de quien lo presenta)
- ◆ Nombre y firma del representante legal (en su caso)
- ◆ Domicilio para recibir notificaciones
- ◆ Datos de las empresas consultoras que intervinieron en la elaboración

2. Objetivos y alcances

Describe los objetivos y alcances de la evaluación en el sitio.

3. Evaluación preliminar

3.1. INFORMACIÓN GENERAL DEL SITIO (ACTUAL E HISTÓRICA)

Incluye la siguiente información:

- ◆ Nombre popular del sitio (por ejemplo, nombre de la empresa, localidad, etc.).
- ◆ Ubicación del sitio (dirección postal y coordenadas georreferenciadas en formato UTM-WGS84).
- ◆ Tamaño (metros cuadrados o hectáreas).
- ◆ Estatus de propiedad, contratos de arrendamiento, concesiones, etc.
- ◆ Procedimientos administrativos a los que se vio sometido el predio.
- ◆ Otros (ver 2.2.1).

3.2. CARACTERÍSTICAS NATURALES DEL SITIO

Incluye la siguiente información:

- ◆ Topografía
- ◆ Geología
- ◆ Hidrogeología e hidrología
- ◆ Clima
- ◆ Cobertura vegetal
- ◆ Fauna y flora
- ◆ Otros (ver 2.2.2)

3.3. HISTORIAL DE LOS USOS EN EL SITIO

Describe los hallazgos y los resultados respecto a la ocupación del suelo y los usos en el área de estudio, obtenidos por:

- ◆ La revisión de información documental,
- ◆ El análisis de fotografías aéreas o satelitales (de ser el caso).
- ◆ La inspección del sitio / visita de campo.
- ◆ Entrevistas (de ser el caso).

Considerar lo señalado en el acápite 2.2 de la presente guía.

Presenta los siguientes elementos orientadores (ver anexo 6):

- ◆ EO 01. Eventos históricos importantes
- ◆ EO 02. Información sobre los procesos productivos
- ◆ EO 03. Documentación del análisis fotogramétrico

3.4. IDENTIFICACIÓN DE POTENCIALES FUENTES Y FOCOS DE CONTAMINACIÓN

Identifica potenciales fuentes y focos de contaminación con base en las evaluaciones realizadas en el marco de la EP. Pondera las fuentes y los focos de acuerdo con su nivel de evidencia.

Presenta los siguientes elementos orientadores (ver anexo 6):

- ◆ EO 04. Potenciales fuentes de contaminación en el sitio
- ◆ EO 05. Potenciales fuentes de contaminación fuera del sitio bajo estudio
- ◆ EO 06. Mapa de las potenciales fuentes de contaminación y de los contaminantes de potencial interés (Cpl)

3.5. MODELO CONCEPTUAL DEL SITIO (PRELIMINAR)

Elabora un MCS preliminar con base en la información obtenida durante la EP. Identifica incertidumbres y vacíos de información con respecto a las fuentes de contaminación y las rutas/vías de exposición relevantes.

La EP preliminar sirve como base para la planificación del MI.

3.6 DETERMINACIÓN DEL ÁREA DE POTENCIAL INTERÉS (API)

De acuerdo a los resultados de la EP y el modelo conceptual preliminar se presenta en un plano indicando las áreas de potencial interés. En la ilustración 23 se presenta un ejemplo..

4. Muestreo de identificación (MI)

4.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Describe los objetivos específicos del MI que resulten pertinentes y necesarios con base en los resultados obtenidos durante la EP (MCS preliminar).

Para mayor información sobre la definición de los objetivos específicos ver acápite 1.6.2 de la presente guía.

4.2. DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES DE MUESTREO REALIZADAS

Describe detalladamente las actividades de muestreo realizadas, en el suelo y en otros componentes ambientales, de ser el caso. La descripción incluye:

- ◆ Tipos de muestras tomadas (suelo: superficial o a profundidad, muestras simples o compuestas; agua subterránea; fase gaseosa del suelo; etc.).
- ◆ Técnicas de muestreo y metodologías aplicadas.
- ◆ Ubicación de los puntos de muestreo (coordenadas georreferenciadas UTM WGS84, representación en planos o mapas).
- ◆ Descripción de las labores en campo (tipo de actividades, calendario).
- ◆ Medidas para el control de la calidad.
- ◆ Aspectos de salud y seguridad ocupacional.
- ◆ Sustento de modificaciones del plan de muestreo en campo, de ser el caso.

4.3. PRESENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

Presenta y evalúa los resultados del MI, lo cual incluye la validación y la interpretación de los datos obtenidos en campo y del análisis químico de las muestras en laboratorio. Asimismo, adjunta las bitácoras de campo, las fichas de muestreo, la memoria fotográfica de las labores, la cadena de custodia de las muestras y los informes de laboratorio (ver punto 7 de esta descripción).

◆ Resultados de campo:

- Hallazgos organolépticos (indicios visuales y olfativos de contaminación).
- Tipos de superficies (suelos expuestos, pavimento, etc.).
- Usos del suelo (huertos, estacionamiento, etc.).
- Tipos de suelos encontrados (granulometría y textura, así como otras características edafológicas de acuerdo a disponibilidad).
- Estratigrafía geológica (en el caso de perforaciones).
- Nivel de la napa freática (encontrado en perforaciones o medido en pozos/piezómetros) y, eventualmente, otros parámetros hidrogeológicos (permeabilidad del subsuelo, flujo del agua subterránea, etc.).

◆ Resultados de laboratorio:

- Presentación de los resultados analíticos en tablas y mapas.
- Validación e interpretación de los resultados analíticos.
- Comparación de las concentraciones de contaminantes en el suelo con los ECA para suelo, los NdF o los estándares internacionales para parámetros no regulados, en caso corresponda.
- Evaluación de los datos del control de la calidad (resultados de muestras duplicadas, etc.).

5. Modelo conceptual del sitio inicial

Retroalimenta el MCS preliminar del sitio con la información obtenida por el MI, considerando lo señalado en el acápite 1.7 de la presente guía.

Presenta el elemento orientador: E0 07. MCS inicial.

6. Conclusiones y recomendaciones

Presenta las conclusiones de la evaluación y formula las recomendaciones para los siguientes pasos. En caso que el estudio concluya en que sea necesario continuar con la fase de caracterización se incluye una propuesta conceptual para el muestreo de detalle.

Las conclusiones y las recomendaciones son debidamente sustentadas.

7. Anexos

1. Planos topográficos de la ubicación del sitio y su entorno que incluya elementos geográficos como infraestructura (edificios, pistas, pozas, plantas, etc.), límites de predios, pozos de agua subterránea, cuerpos de aguas superficiales (ríos, lagos, etc.), zonas de protección especial (por ejemplo, parques naturales, áreas naturales protegidas, etc.).
2. Planos georreferenciados y ortocorregidos de las instalaciones y/o los componentes en el sitio (edificios, tanques aéreos o subterráneos, otros componentes operativos o desactivados); para ello se superponen capas (*layers*) con las instalaciones actuales e históricas.

3. Mapas con los potenciales fuentes y focos de contaminación; elementos que muestren los usos actuales e históricos potencialmente contaminantes en el sitio, así como áreas que indiquen usos sensibles en el sitio y su entorno (por ejemplo, jardines de niños, huertos, colegios, pozos de abastecimiento); representación visual de las áreas de potencial interés (Apl).
4. Mapa con la ubicación de los puntos de muestreo, indicando el tipo de muestreo (de ser el caso).
5. Mapa con los resultados del muestreo: presenta un mapa para cada parámetro que supere los ECA para suelo o los NdF; indicar en el mapa de forma gráfica la superación del ECA (por ejemplo, con color rojo) y la concentración del contaminante correspondiente.
6. Lista de los documentos revisados y de otras informaciones analizadas.
7. Copias de las fotografías aéreas o de las imágenes satelitales analizadas (de ser el caso).
8. Registros de la inspección del sitio firmados por el operador en campo.
9. Memoria fotográfica de la inspección del sitio. La denominación de las fotografías debe incluir la fecha, la ubicación, la dirección visual y el contenido de la imagen. Asimismo, se debe agregar un mapa con la ubicación de los puntos en los que se tomaron las fotografías con su respectiva clave.
10. Fichas de las encuestas realizadas, firmadas por el entrevistador y el entrevistado.
11. Fichas del muestreo de suelos, y de otros componentes ambientales (de ser el caso).
12. Relación que resuma los resultados analíticos en suelos, y de otros componentes ambientales, de ser el caso. En las tablas se deben destacar de forma visual (por ejemplo, asignando al valor el color rojo) las muestras que superan los ECA para suelo, los NdF o los estándares internacionales (de ser el caso).
13. Informes de laboratorio de los ensayos físico-químicos realizados en suelos y en otros componentes ambientales, de ser el caso. Asimismo, se deben agregar la cadena de custodia de las muestras, los certificados de calibración y la documentación del control de calidad interno del laboratorio.
14. Comparación y evaluación de los resultados de las muestras duplicadas, tomadas para el control de calidad.
15. Propuesta de plan de muestreo de detalle (en caso corresponda).

ANEXO 3

Estudio de caracterización (EC): estructura y descripción del contenido

Resumen ejecutivo

1. Datos generales

- 1.1. Nombre y/o razón social (de quien lo presenta)
- 1.2. Nombre y firma del representante legal (en su caso)
- 1.3. Domicilio para recibir notificaciones
- 1.4. Datos de las empresas que intervinieron en la elaboración

2. Antecedentes

- 2.1. Historia
- 2.2. Estudios realizados

3. Objetivos y alcances

4. Información general del sitio contaminado

- 4.1. Ubicación
- 4.2. Descripción general
- 4.3. Uso actual y uso futuro planificado
- 4.4. Condiciones naturales del sitio (geografía, clima, hidrología, geología e hidrogeología)
- 4.5. Resumen de los estudios realizados respecto a la contaminación

5. Muestreo de detalle (MD)

- 5.1. Objetivos específicos
- 5.2. Descripción de las actividades de muestreo realizadas
- 5.3. Presentación y validación de los resultados

6. Evaluación de riesgos para la salud y el ambiente (ERSA) facultativa

7. Evaluación e interpretación de los resultados

- 7.1. Descripción de la contaminación en el sitio
- 7.2. Modelo conceptual del sitio
- 7.3. Estimación de los riesgos potenciales para las personas y para el ambiente asociados a la contaminación del sitio (con base en el MCS si no se contase con una ERSA)
- 7.4. Determinación de la necesidad de elaborar un PdR

8. Conclusiones y recomendaciones

9. Anexos

DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO DEL ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN

Resumen ejecutivo

Breve descripción de los trabajos realizados, los hallazgos y los resultados principales, y las conclusiones claves del estudio.

1. Datos generales

Contiene los datos generales de la(s) persona(s) natural(es) y/o jurídica(s) quienes presentan el estudio de caracterización e intervinieron en su elaboración, como:

- ◆ Nombre y/o razón social de quien lo presenta.
- ◆ Nombre y firma del representante legal (en su caso).
- ◆ Domicilio para recibir notificaciones.
- ◆ Datos de las empresas que intervinieron en su elaboración.

2. Antecedentes

Describe los antecedentes del estudio de caracterización, como la situación inicial del sitio, los estudios realizados (IISC, informes técnicos de autoridades y de terceros, etc.) y las obligaciones legales con respecto a la evaluación y a la remediación del sitio.

3. Objetivos y alcances

Describe los objetivos generales y específicos del estudio de caracterización y sus alcances y/o limitaciones legales (ver también los acápites 1.6 y 4.7 de la presente guía).

4. Información del sitio contaminado

4.1. UBICACIÓN

Define la ubicación del sitio contaminado, considerando también sus límites geográficos. Este apartado incluye:

- ◆ Departamento, provincia, municipio, centro poblado, localidad.
 - Si el sitio está localizado en un área urbana, además: urbanización, dirección, identificación catastral del predio, en caso exista.
 - Si el sitio está localizado en un área rural: nombre de localidad más cercana.
 - Si el sitio se encuentra en una vía de comunicación: kilómetro en ducto o kilómetro en carretera o información similar.

- ◆ Coordenadas UTM (WGS 84) del polígono del predio en estudio (en zonas urbanas / industriales), de la concesión minera o del lote petrolero, y dentro del polígono la localización de las áreas contaminadas.

4.2. DESCRIPCIÓN GENERAL

Resume la información existente con respecto a:

- ◆ Usos históricos del sitio, incluyendo tipos de actividades que se desarrollaron en el sitio, periodos de operación, cambios del propietario y/o titular, modificaciones del uso, cierre de operaciones, etc.
- ◆ Componentes, instalaciones y/o edificaciones históricas y remanentes en el sitio.
- ◆ Características de la superficie del terreno (suelos expuestos, áreas pavimentadas o con losas de concreto, cobertura vegetal, etc.).
- ◆ Motivo o causa de la contaminación de cada área afectada.
- ◆ Aspectos socioeconómicos y culturales del entorno.
- ◆ Señalar si el sitio se encuentra en un área natural protegida, zona de veda, área de captación de agua, patrimonio cultural u otro tipo de protección.

4.3. USO ACTUAL Y SU USO FUTURO PLANIFICADO

- ◆ Uso actual: describe el uso autorizado y el uso real del sitio, considerando que pueden existir casos en los que este último difiera del uso autorizado (por ejemplo, usos residenciales en zonas industriales). Determina los usos más sensibles en el sitio (por ejemplo, centros de educación inicial, cultivos de plantas alimenticias, etc.).
- ◆ Uso futuro planificado: señala el uso que se haya previsto para el sitio, por ejemplo en el marco de un cambio de la zonificación urbana, en caso corresponda.

4.4. CONDICIONES NATURALES

Resume la información existente con respecto a las condiciones naturales. La información se presenta en función a la temporalidad, sustentado con datos meteorológicos, para los componentes ambientales que lo requieran.

4.4.1. GEOGRAFÍA

Describe las condiciones geográficas, como:

- ◆ Zona geográfica
- ◆ Cuenca hidrológica
- ◆ Topografía (altura, geomorfología del terreno, pendientes, etc.)
- ◆ Tipo de suelos
- ◆ Vías de acceso (pistas, carreteras, etc.)

4.4.2. CLIMA

Describe las condiciones climáticas, como:

- ◆ Temperatura (mensual, máxima y mínima)
- ◆ Precipitación (mensual, máxima y mínima)
- ◆ Dirección de viento (predominante, estacional)
- ◆ Ubicación de estaciones meteorológicas para la medición de parámetros climáticos

4.4.3. HIDROLOGÍA

Describe las condiciones hidrológicas, como:

- ◆ Ubicación de cuerpos de agua superficiales (ríos, riachuelos, lagunas, lagos, construcciones antrópicas como represas y canales, etc.)
- ◆ Ubicación de estaciones hidrológicas
- ◆ Caudal de ríos/riachuelos (máximo, mínimo, promedio)
- ◆ Eventualmente, otros parámetros hidrológicos (tasas de descarga, evaporación y renovación de acuíferos, etc.)

4.4.4. GEOLOGÍA

Describe las condiciones geológicas, como:

- ◆ Geología regional (unidades y formaciones geológicas)
- ◆ Geología local (estratigrafía, mineralizaciones, geología estructural, etc.)
- ◆ Otras informaciones sobre las características físico-químicas del subsuelo en el área de estudio (por ejemplo, parámetros geotécnicos), de estar disponibles

4.4.5. HIDROGEOLOGÍA

Describe las condiciones hidrogeológicas, como:

- ◆ Estratigrafía hidrogeológica del subsuelo en el área de estudio
- ◆ Tipo de acuíferos (porosos, fracturados o kársticos)
- ◆ Nivel de la napa freática y sus variaciones estacionales / anuales
- ◆ Parámetros hidrogeológicos del subsuelo (permeabilidad o conductividad hidráulica [coeficiente k], porosidad, dirección y velocidad del flujo de aguas subterráneas, etc.)
- ◆ Inventario de pozos / piezómetros, y sus características (ubicación, tipo de pozo, revestimiento, profundidad, usos del agua, etc.)
- ◆ Presencia de estratos permeables (por ejemplo, gravas y arenas) o impermeables (por ejemplo, arcilla o limo) que pueden facilitar o evitar la migración de contaminantes en el subsuelo

4.4.6. BIOTA

- ◆ Caracterización de flora, fauna e hidrobiología dentro y fuera del sitio de

acuerdo al modelo conceptual del sitio actualizado.

- ◆ Flora
- ◆ Fauna
- ◆ Hidrobiología: comunidades acuáticas (de corresponder)

4.5. RESUMEN DE LOS ESTUDIOS REALIZADOS RESPECTO A LA CONTAMINACIÓN EN EL SITIO

Resume las informaciones del IISC, y de otros estudios disponibles con respecto a la contaminación del sitio.

5. Muestreo de detalle (MD)

5.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Describe los objetivos específicos del MD que resulten pertinentes y necesarios con base en los resultados obtenidos durante la fase de identificación (MCS inicial).

Para mayor información sobre la definición de los objetivos específicos ver 1.6.2.

5.2. DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES DE MUESTREO REALIZADAS

Describe detalladamente las actividades de muestreo realizadas, en el suelo y en otros componentes ambientales, de ser el caso. La descripción incluye:

- ◆ Tipos de muestras tomadas (suelo: superficial o a profundidad, muestras simples o compuestas; agua subterránea; fase gaseosa del suelo; etc.).
- ◆ Técnicas de muestreo y metodologías aplicadas.
- ◆ Ubicación de los puntos de muestreo (coordenadas georreferenciadas UTM WGS84, representación en planos o mapas).
- ◆ Descripción de las labores en campo (tipo de actividades, calendario).
- ◆ Medidas para el control de la calidad.
- ◆ Aspectos de salud y seguridad ocupacional.
- ◆ Sustento de modificaciones del plan de muestreo en campo, de ser el caso.

5.3. PRESENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

Presenta y evalúa los resultados del MD, que incluye la validación y la interpretación de los datos obtenidos en campo y mediante el análisis químico de las muestras en laboratorio. Las bitácoras de campo, las fichas de muestreo, la memoria fotográfica de las labores, la cadena de custodia de las muestras y los informes de laboratorio se adjunta al informe (ver punto 9 de esta descripción).

- ◆ Resultados de campo
 - Hallazgos organolépticos (indicios visuales y olfativos de contaminación).
 - Tipos de superficies (suelos expuestos, pavimento, etc.).
 - Usos del suelo (huertos, estacionamiento, etc.).

- Tipos de suelo encontrados.
- Estratigrafía geológica (en el caso de perforaciones).
- Nivel de la napa freática (encontrado en perforaciones o medido en pozos/piezómetros) y, eventualmente, otros parámetros hidrogeológicos (permeabilidad del subsuelo, flujo del agua subterránea, etc.).
- ◆ Resultados de análisis *in situ* y laboratorio
 - Presentación de los resultados analíticos en tablas y mapas.
 - Validación e interpretación de los resultados analíticos.
 - Comparación de las concentraciones de contaminantes en el suelo con los ECA para suelo, los NdF o los estándares internacionales para parámetros no regulados, en caso corresponda.
 - Evaluación de los datos del control de la calidad (resultados de muestras duplicadas, etc.).

6. Evaluación de riesgo para la salud y el ambiente (ERSA) facultativa

Incluye un breve resumen del estudio de ERSa, en caso se haya realizado. Este estudio es elaborado con base en la Guía para la elaboración de estudios de ERSa en sitios contaminados⁶⁴ (MINAM, 2015).

7. Evaluación e interpretación de los resultados

7.1. DESCRIPCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN EL SITIO

Describe la contaminación en el sitio con base en los estudios realizados con respecto a:

- Fuentes primarias y secundarias de la contaminación.
- Tipo de contaminantes.
- Componentes ambientales afectados por la contaminación (suelo, agua subterránea, fase gaseosa del suelo, sedimentos, etc.).
- Extensión vertical y horizontal de la contaminación en el suelo y en otros componentes ambientales (de ser el caso).
- Mecanismos de liberación de contaminantes al ambiente.
- Rutas de migración para los contaminantes en los diferentes medios ambientales.

7.2. MODELO CONCEPTUAL DEL SITIO (MCS) ACTUALIZADO

Presenta el MCS de acuerdo con lo señalado en el acápite 1.7 de la presente guía. Este debe elaborarse con base en el MCS inicial del sitio, el cual se elaboró al final de la fase de identificación. Para ello, el MSC inicial es retroalimentado con la información obtenida en el marco de la caracterización del sitio.

7.3. ESTIMACIÓN DE LOS RIESGOS POTENCIALES PARA LAS PERSONAS Y EL AMBIENTE ASOCIADOS A LA CONTAMINACIÓN DEL SITIO

Describe los riesgos potenciales para las personas y el ambiente asociados a la contaminación del sitio con base en el MCS, en caso de no contar con una

64. Resolución Ministerial N° 034-2015-MINAM

evaluación de los riesgos reales determinados por un estudio de ERSA.

7.4. DETERMINACIÓN DE LA NECESIDAD DE ELABORAR UN PDR

Evalúa y sustenta técnicamente la necesidad de remediar el sitio bajo estudio, considerando como criterio principal los riesgos (potenciales) de la contaminación para las personas y para el ambiente identificados en el marco de los estudios realizados.

Para mayor información sobre este asunto, ver acápite 3.4 de la presente guía.

8. Conclusiones y recomendaciones

Presenta las conclusiones del EC y formula recomendaciones para los siguientes pasos, sobre todo con respecto a la necesidad de remediar el sitio y al alcance que debe tener dicha remediación, en caso corresponda.

9. Anexos

1. Planos topográficos de la ubicación del sitio y su entorno, y de los límites geográficos del estudio; los planos incluyen elementos de orientación y geográficos, como infraestructura (edificios, pistas, pozas, plantas, etc.), límites de predios, pozos de agua subterránea, cuerpos de aguas superficiales (ríos, lagos, etc.), zonas de protección especial (por ejemplo, parques naturales, áreas naturales protegidas, etc.).
2. Planos georreferenciados y ortocorregidos de las instalaciones y/o los componentes en el sitio (edificios, tanques aéreos o subterráneos, otros componentes operativos o desactivados); para ello se deben superponer capas (*layers*) con las instalaciones actuales e históricas.
3. Mapas con los potenciales fuentes y focos de contaminación; incluir elementos que muestren los usos actuales e históricos potencialmente contaminantes en el sitio, así como áreas que indican usos sensibles en el sitio y su entorno (por ejemplo, jardines de niños, huertos, colegios, pozos de abastecimiento); representar las Apl.
4. Mapas con la ubicación de los puntos de muestreo, indicando el tipo de muestreo. En los mapas se señalan tanto los puntos de MD como los de muestreos realizados previamente (por ejemplo, en el marco de la fase de identificación).
5. Mapa con los resultados de los muestreos realizados en el sitio: presentar un mapa para cada parámetro que supera los ECA para suelo o los NdF; indicar en el mapa de forma gráfica la superación del ECA (por ejemplo con color rojo) y la concentración del contaminante correspondiente. Además, mostrar la ubicación de las fuentes y los focos de contaminación, las áreas contaminadas, etc.
6. Eventualmente otros mapas o perfiles que presenten los resultados de la caracterización del sitio (mapas de concentración de contaminantes en

el agua subterránea, perfiles geológicos con los resultados analíticos, etc.).

7. Relación con los resultados analíticos en suelos y otros componentes ambientales, de ser el caso. En las tablas se deben destacar de forma visual (por ejemplo, asignar al valor el color rojo) las muestras que superan los ECA para suelo, los NdF o los estándares internacionales (de ser el caso).
8. Memoria fotográfica del MD. La denominación de las fotografías que incluyen la fecha, la ubicación, la dirección visual y el contenido de la imagen. Asimismo, se agrega un mapa con la ubicación de los puntos donde se tomaron las fotografías con su respectiva clave.
9. Bitácoras de campo, fichas de muestreo de suelos y de otros componentes ambientales (de ser el caso).
10. Informes de laboratorio de los ensayos físico-químicos realizados en suelos y en otros componentes ambientales, de ser el caso. Asimismo, se debe agregar la cadena de custodia de las muestras, los certificados de calibración y la documentación del control de calidad interno del laboratorio.
11. Comparación y evaluación de los resultados de las muestras duplica-

ANEXO 4

Plan dirigido a la remediación (PdR): estructura y descripción del contenido

ESTRUCTURA DEL PdR

Resumen ejecutivo

1. Datos generales

- 1.1. Nombre y/o razón social de quien lo presenta
- 1.2. Nombre y firma del representante legal (en su caso)
- 1.3. Domicilio para recibir notificaciones
- 1.4. Datos de las empresas que intervinieron en la elaboración

2. Antecedentes

3. Objetivos y alcance

4. Resumen de la información sobre el sitio contaminado

- 4.1. Ubicación
- 4.2. Descripción general
- 4.3. Uso actual y su uso futuro planificado
- 4.4. Condiciones naturales del sitio (geografía, clima, hidrología, geología e hidrogeología)
- 4.5. Descripción de la contaminación en el sitio
- 4.6. Modelo conceptual del sitio
- 4.7. Resumen de la evaluación de riesgo para la salud y el ambiente (ERSA), en caso corresponda
- 4.8. Descripción de los riesgos potenciales para las personas y para el ambiente asociados a la contaminación del sitio

5. Análisis de las alternativas de remediación

- 5.1. Tecnologías disponibles
- 5.2. Sostenibilidad
- 5.3. Costo-efectividad
- 5.4. Factores de ecoeficiencia
- 5.5. Resultados de pruebas de laboratorio o ensayos piloto (de ser el caso)
- 5.6. Selección de la propuesta preferida

6. Planificación detallada de la propuesta de remediación

- 6.1. Objetivos específicos de las medidas de remediación
- 6.2. Descripción de las medidas de remediación
- 6.3. Plan de control y de monitoreo en la ejecución
- 6.4. Plan de manejo de residuos
- 6.5. Propuesta de medidas de seguimiento
- 6.6. Plan de muestreo de comprobación
- 6.7. Calendario de ejecución de actividades
- 6.8. Estimación de costos

7. Conclusiones y recomendaciones

8. Anexos

das tomadas para el control de calidad.

12. Plan de muestreo de detalle (elaborado previamente a su ejecución).

DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO DEL PdR

RESUMEN EJECUTIVO

Breve descripción de los trabajos realizados, de los hallazgos y resultados principales, y de las conclusiones claves del estudio.

1. Datos generales

Contiene los datos generales de la(s) persona(s) natural(es) y/o jurídica(s) quienes presentan el PdR e intervinieron en su elaboración, como:

- ◆ Nombre y/o razón social de quien presenta el PdR
- ◆ Nombre y firma del representante legal (en su caso)
- ◆ Domicilio para recibir notificaciones
- ◆ Datos de las empresas que intervinieron en la elaboración

2. Antecedentes

Describe los antecedentes del PdR, como la situación inicial del sitio, los estudios realizados (IISC, estudio de caracterización, ERSA, informes técnicos de autoridades y de terceros, etc.) y obligaciones legales con respecto a la evaluación y a la remediación del sitio.

3. Objetivos y alcances

Describe los objetivos generales y específicos del PdR y sus alcances y/o limitaciones legales (ver acápites 1.6 y 4.7 de la presente guía).

4. Resumen de la información

Resume la información obtenida durante las evaluaciones realizadas en el sitio contaminado. En tal sentido, se trata de un extracto de los datos relevantes del IISC, el estudio de caracterización y, eventualmente, de otros estudios realizados como el ERSA.

En caso que se presente el PdR junto con el estudio de caracterización se puede omitir el desarrollo de este capítulo, haciendo referencia a los apartados correspondientes del estudio de caracterización.

4.1. UBICACIÓN

Define la ubicación del sitio contaminado, considerando también sus límites geográficos. Este apartado incluye:

- ◆ Departamento, provincia, municipio, centro poblado, localidad.
 - Si el sitio está localizado en un área urbana, además: urbanización, dirección, identificación catastral del predio, en caso exista.

- Si el sitio está localizado en un área rural: nombre de la localidad más cercana.
- Si el sitio se encuentra en una vía de comunicación: kilómetro en ducto o kilómetro en carretera o información similar.
- ◆ Coordenadas UTM (WGS 84) del polígono del predio en estudio (en zonas urbanas / industriales), de la concesión minera o del lote petrolero, y dentro del polígono la localización de las áreas contaminadas.

4.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SITIO CONTAMINADO

Resume la información del IISC y del estudio de caracterización, con respecto a:

- ◆ Usos históricos del sitio, incluyendo tipos de actividades que se desarrollaron antes, periodos de operación, cambios del propietario y/o titular, modificaciones del uso, cierre de operaciones, etc.
- ◆ Componentes, instalaciones y/o edificaciones históricas y remanentes en el sitio.
- ◆ Características de la superficie del terreno (suelos expuestos, áreas pavimentadas o con losas de concreto, cobertura vegetal, etc.).
- ◆ Motivo o causa de la contaminación de cada área afectada.
- ◆ Aspectos socioeconómicos y culturales del entorno.
- ◆ Señalar si el sitio se encuentra en un área natural protegida, zona de veda, área de captación de agua, patrimonio cultural u otro tipo de protección.

4.3. USO ACTUAL Y SU USO FUTURO PLANIFICADO

- ◆ Uso actual: describe el uso autorizado y el uso real del sitio. Pueden existir casos en los que este último difiera del uso autorizado (por ejemplo, usos residenciales en zonas industriales). Determina los usos más sensibles en el sitio (por ejemplo, jardines de niños, cultivos de plantas alimenticias, etc.).
- ◆ Uso futuro planificado: señala el uso que se haya previsto para el sitio, por ejemplo en el marco de un cambio de la zonificación urbana, en caso corresponda.

4.4. CONDICIONES NATURALES (GEOGRAFÍA, CLIMA, HIDROLOGÍA, GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA)

Resume la información del estudio de caracterización con respecto a:

4.4.1. GEOGRAFÍA

Describe las condiciones geográficas, como:

- ◆ Zona geográfica
- ◆ Cuenca hidrológica
- ◆ Topografía (altura, geomorfología del terreno, pendientes, etc.)
- ◆ Tipo de suelos
- ◆ Vías de acceso (pistas, carreteras, etc.)

4.4.2. CLIMA

Describe las condiciones climáticas, como:

- ◆ Temperatura (mensual, máxima y mínima)
- ◆ Precipitaciones (mensual, máxima y mínima)
- ◆ Dirección de viento (predominante, estacional)
- ◆ Ubicación de estaciones para la medición de parámetros climáticos

4.4.3. HIDROLOGÍA

Describe las condiciones hidrológicas, como:

- ◆ Ubicación de cuerpos de agua superficiales (ríos, riachuelos, lagunas, lagos, construcciones antrópicas como represas y canales, etc.)
- ◆ Ubicación de estaciones hidrológicas
- ◆ Caudal de los ríos/riachuelos (máximo, mínimo, promedio)
- ◆ Eventualmente, otros parámetros hidrológicos (tasas de descarga, evaporación y renovación de acuíferos, etc.)

4.4.4. GEOLOGÍA

Describe las condiciones geológicas, como:

- ◆ Geología regional (unidades y formaciones geológicas)
- ◆ Geología local (estratigrafía, mineralizaciones, geología estructural, etc.)
- ◆ Otras informaciones sobre las características físico-químicas del subsuelo en el área de estudio (por ejemplo, parámetros geotécnicos), de estar disponibles.

4.4.5. HIDROGEOLOGÍA

Describe las condiciones hidrogeológicas, como:

- ◆ Estratigrafía hidrogeológica del subsuelo en el área de estudio
- ◆ Tipo de acuíferos (porosos, fracturados o kársticos)
- ◆ Nivel de la napa freática y sus variaciones estacionales / anuales
- ◆ Parámetros hidrogeológicos del subsuelo (permeabilidad o conductividad hidráulica [coeficiente k], porosidad, dirección y velocidad del flujo de aguas subterráneas, etc.)
- ◆ Inventario de pozos / piezómetros y sus características (ubicación, tipo de pozo, vestimiento, profundidad, usos del agua, etc.)
- ◆ Presencia de estratos permeables (por ejemplo gravas y arenas) o impermeables (por ejemplo arcilla o limo) que pueden facilitar o evitar la migración de contaminantes en el subsuelo

4.5. DESCRIPCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN EL SITIO

Resume la información del estudio de caracterización con respecto a:

- ◆ Fuentes primarias y secundarias de la contaminación.

- ◆ Tipo de contaminantes.
- ◆ Componentes ambientales afectados por la contaminación (suelo, agua subterránea, fase gaseosa del suelo, sedimentos, etc.).
- ◆ Extensión vertical y horizontal de la contaminación en el suelo, y en otros componentes ambientales (de ser el caso).
- ◆ Mecanismos de liberación de contaminantes al ambiente.
- ◆ Rutas de migración para los contaminantes en los diferentes medios ambientales.

4.6 MODELO CONCEPTUAL DEL SITIO FINAL

Presenta el MCS de acuerdo con lo señalado en el acápite 1.7 de la presente guía.

4.7. RESUMEN DE LA EVALUACIÓN DE RIESGO PARA LA SALUD Y EL AMBIENTE (ERSA), EN CASO CORRESPONDA

Resume la información, los resultados y las conclusiones de la ERSA, en caso se haya realizado este tipo de estudio.

4.8. DESCRIPCIÓN DE LOS RIESGOS POTENCIALES PARA LAS PERSONAS Y PARA EL AMBIENTE

Describe los riesgos potenciales para las personas y para el ambiente asociados a la contaminación del sitio con base en el MCS, en caso no contar con una evaluación de los riesgos reales determinados por un estudio de ERSA.

Los riesgos potenciales identificados son evaluados con respecto a la necesidad de tomar medidas de remediación.

En este apartado se resume también las conclusiones del estudio de caracterización con respecto a la necesidad de remediar el sitio.

4.9 DETERMINACIÓN DEL ÁREA Y VOLUMEN A REMEDIAR

Describir la determinación del área y volumen de suelo y otros componentes ambientales (de ser el caso) a remediar. Las metodologías para el cálculo consideran el tipo de contaminación y las condiciones del sitio. Un ejemplo es la aplicación de métodos de interpolación como los polígonos de Thiessen.

5. Análisis de las alternativas de remediación

Propone y analiza alternativas de remediación para el sitio contaminado, considerando los aspectos que se señalan a continuación (ver también acápite 4.4 de la presente guía).

5.1. TECNOLOGÍAS DISPONIBLES

Determina las mejores tecnologías y técnicas disponibles para la remediación del sitio, considerando lo expuesto en el acápite 4.4.1.

5.2. SOSTENIBILIDAD

Determina la sostenibilidad de las alternativas de remediación en el tiempo,

considerando lo expuesto en el acápite 4.4.2.

5.3. COSTO-EFECTIVIDAD

Realiza un análisis de costo-efectividad de las alternativas de remediación con el fin de determinar la alternativa más económica con respecto a alcanzar los objetivos de remediación.

El análisis de costo-efectividad es opcional, puesto que el costo de la remediación no es un criterio que rige la aprobación del PdR por parte de las autoridades competentes (ver acápite 4.4.3).

5.4. FACTORES DE ECOEFICIENCIA

Realiza una evaluación de los factores de ecoeficiencia de las diferentes opciones de remediación, considerando lo expuesto en el acápite 4.4.4.

5.5. RESULTADOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO O ENSAYOS PILOTO

En el caso que se hayan realizado pruebas de laboratorio o ensayos piloto se deben considerar sus resultados para determinar la técnica de remediación más idónea (ver acápite 4.4.5).

5.6. SELECCIÓN DE LA PROPUESTA PREFERIDA

Con base en el análisis de alternativas, se determina la propuesta de remediación, es decir, se proponen la o las medida(s) que resultan más idóneas y apropiadas para la remediación del sitio contaminado (ver acápite 4.5).

6. Planificación detallada de la propuesta de remediación

6.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Establece los objetivos específicos de las medidas de remediación. En el caso que se apliquen combinaciones de técnicas, se definen objetivos para cada una de ellas. Asimismo, se establecen objetivos específicos para cada componente ambiental, si la remediación incluyese diferentes medios ambientales (suelo, aguas subterráneas, sedimentos, etc.).

Para mayor detalle sobre el establecimiento de objetivos específicos de remediación, ver acápite 4.5.1 de la presente guía.

6.2. DESCRIPCIÓN DE LAS MEDIDAS DE REMEDIACIÓN

Describe de forma textual y gráfica (en planos, mapas, flujogramas, etc.) las medidas de remediación a aplicarse, y el sustento técnico que justifica su idoneidad para alcanzar los objetivos de remediación establecidos. Para mayor detalle, ver acápite 4.5.2 de la presente guía.

La descripción incluye los siguientes aspectos:

- ◆ Las técnicas y/o los procesos de remediación planteados.
- ◆ El ámbito geográfico de la remediación, incluyendo las áreas donde se

aplican las medidas de remediación y las áreas de influencia de estas.

- ◆ Identificación y descripción de componentes e instalaciones a emplear en la remediación.
- ◆ Describir los equipos, maquinarias, insumos y mano de obra a emplear en la remediación.
- ◆ Los elementos y el procedimiento cronológico de la remediación, considerando:
 - El orden de aplicación de obras civiles, el movimiento de masas y de labores de demolición de instalaciones o componentes.
 - El almacenamiento temporal de suelos contaminados y de otros residuos (escombros, residuos peligrosos, etc.).
 - El reúso de suelos o residuos tratados, en el sitio u *off-site*.
 - La disposición *off-site* de suelos contaminados o de residuos.
- ◆ Cálculos y especificaciones técnicos, por ejemplo para el diseño de:
 - Plantas de tratamiento *on-site* para suelos contaminados o residuos.
 - Medidas *in situ*.
 - Plantas para la captación y el tratamiento de gases de botaderos o vapores del suelo.
 - Plantas de tratamiento para aguas subterráneas.
- ◆ Estimación de masas de suelos contaminados y de otros residuos (escombros, residuos peligrosos, etc.) para tratamientos *ex situ*.
- ◆ Especificaciones técnicas de las medidas de aseguramiento (por ejemplo, para las capas y los elementos constructivos de un confinamiento).
- ◆ Puntos críticos en los que se pueden generar emisiones a la atmósfera, descargas de agua contaminada, subproductos y residuos peligrosos y sus volúmenes aproximados de generación.
- ◆ Describir las medidas ambientales y sus respectivos programas de manejo ambiental de los posibles impactos generados por la remediación (por ejemplo: programas de manejo de calidad de aire y ruido, del recurso suelo, flora y fauna, de recursos hídricos, efluentes, aguas pluviales, revegetación / reforestación y control de erosión (en caso corresponda).
- ◆ Medidas de salud y seguridad ocupacional.

6.3. PLAN DE CONTROL Y DE MONITOREO EN LA EJECUCIÓN

Expone las medidas de supervisión internas para garantizar la calidad y la eficacia de las obras de remediación con respecto a:

- ◆ Manejo del suelo en la excavación, la separación y la reposición.
- ◆ Tratamiento del suelo y de las aguas subterráneas, desgasificación o extracción de vapores del suelo.
- ◆ Muestreo y análisis de acompañamiento a las obras de remediación.

6.4. PLAN DE MANEJO DE RESIDUOS

Desarrolla un plan para el manejo de los residuos que las operaciones o las acciones de remediación pudieran generar (de ser el caso), considerando lo siguiente:

- ◆ Tipo de residuos que se generan durante la remediación (por ejemplo, suelos contaminados, escombros, líquidos peligrosos de recuperación de fase libre, lodos, carbono activado agotado de plantas de tratamiento, etc.) y sus características,
- ◆ Estimación de masas y/o volúmenes.
- ◆ Gestión del flujo de masas, desde la generación (por ejemplo, excavación de suelos contaminados) hasta el destino final de los residuos (por ejemplo, reposición de suelos tratados, disposición final en relleno de seguridad), incluyendo actividades de manejo (por ejemplo, separación y clasificación de suelos de acuerdo con el grado de contaminación).
- ◆ Calendario de desalojo de los residuos.

6.5. PROPUESTA DE MEDIDAS DE SEGUIMIENTO

Plan de monitoreo posterior a las obras de remediación en los diferentes medios afectados para probar la sostenibilidad con respecto a la eficacia de las acciones de remediación ejecutadas. Aplicable sobre todo para remediaciones con medidas de aseguramiento.

6.6. PLAN DE MUESTREO DE COMPROBACIÓN

Se elabora de conformidad con lo establecido en la guía para el muestreo de suelos⁶⁵ (MINAM, 2014). El muestreo de comprobación debe ser apropiado para verificar el cumplimiento de los objetivos generales y específicos de remediación (ver también acápite 4.6 de la presente guía).

El plan considera los siguientes aspectos:

- ◆ Los medios ambientales que deben muestrearse (por ejemplo, suelos, aguas subterráneas, fase gaseosa del suelo).
- ◆ Lugar o área para la toma de muestras (por ejemplo, zanjas de excavación, piezómetros).
- ◆ Alcance del muestreo (por ejemplo, número de muestras).
- ◆ Parámetros a analizar.
- ◆ Criterios de cumplimiento (con base en los objetivos de remediación).

6.7. CALENDARIO DE EJECUCIÓN DE ACTIVIDADES

Presenta el calendario de los trabajos a realizar, incluyendo las obras civiles planteadas, la instalación y el inicio de operaciones de plantas de tratamiento, del programa para la reubicación o el movimiento de suelos/residuos, transporte y disposición *off-site* de residuos generados durante la remediación (suelos contaminados, escombros, residuos peligrosos, lodos, etc.).

6.8. ESTIMACIÓN DE COSTOS

Estima los costos de remediación, considerando:

65. Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM

- ◆ Mano de obra
- ◆ Materiales, insumos y equipos
- ◆ Consumo de agua y energía
- ◆ Manejo, tratamiento y disposición de residuos
- ◆ Muestreo y análisis
- ◆ Servicios de ingeniería
- ◆ Planificación y supervisión
- ◆ Otras medidas

7. Conclusiones y recomendaciones

Presenta las conclusiones del PdR y formula recomendaciones para los siguientes pasos, de corresponder.

8. Anexos

1. Planos topográficos de la ubicación del sitio y su entorno, y de los límites geográficos del PdR; los planos incluyen elementos de orientación y geográficos, como infraestructura (edificios, pistas, pozas, plantas, etc.), límites de predios, pozos de agua subterránea, cuerpos de aguas superficiales (ríos, lagos, etc.), y zonas de protección especial (por ejemplo, parques naturales, áreas naturales protegidas, etc.).
2. Planos georreferenciados y ortocorregidos de las instalaciones y/o los componentes en el sitio (edificios, tanques aéreos o subterráneos, otros componentes operativos o desactivados); para ello se superponen capas (*layers*) con las instalaciones actuales e históricas.
3. Mapas que resumen los resultados de la caracterización del sitio (ubicación de las fuentes y los focos de contaminación, puntos de muestreo y áreas contaminadas, etc.).
4. Relación que resume los resultados analíticos en suelos, y de otros componentes ambientales, de ser el caso. En las tablas se destacan de forma visual (por ejemplo asignar al valor el color rojo) de las muestras que superan los ECA para suelo, los NdF o los estándares internacionales (de ser el caso).
5. Planos y mapas georreferenciados de la determinación del área y volumen de suelo y otros componentes ambientales (de ser el caso) a remediar.
6. Mapas y planos que presentan gráficamente la propuesta de remediación (por ejemplo, componentes e instalaciones a ser derrumbados, áreas para la excavación de suelos incluyendo profundidades, detalles de las obras civiles planteadas, áreas para el almacenamiento temporal de suelos y/o residuos, infraestructura de apoyo como pistas provisionales, ubicación de plantas de tratamiento para suelos, residuos, aguas subterráneas, puntos de descarga para aguas subterráneas tratadas, etc.).
7. Matriz del análisis de las alternativas de remediación (opcional).
8. Flujogramas de los procesos de remediación planteados.
9. Mapas y tablas que presentan el plan de muestreo de comprobación.
10. Calendario de ejecución.

ANEXO 5

Cuestionario para el levantamiento técnico (inspección) del sitio: formato

Nota importante: este cuestionario es un ejemplo que puede ser modificado en función de cada situación particular según tipo de actividades o procesos.

1. DATOS DEL SITIO Y SU HISTÓRICO DE USO

1.1. Ubicación del sitio

1.1.1. Dirección:.....

1.1.2. Coordenadas (UTM WGS84 -Zona.....

1.2. Histórico de la ocupación del sitio y sus usos

1.2.1. Propietarios o poseedores conocidos:

a).....

b).....

c).....

1.2.2. Rama productiva actual y pasada (marcar uso principal del periodo más prolongado)

Actual:..... A partir de:

1) Uso / actividad industrial anterior: Desde: Hasta:

2) Uso / actividad industrial anterior: Desde: Hasta:

1.3. Información complementaria (para cada actividad desarrollada)

1.3.1. Número de trabajadores:

.....

1.3.2. ¿Se observaron enfermedades ocupacionales durante el funcionamiento?

.....

1.3.3. ¿Existen/existían licencias de funcionamiento, instrumentos de gestión ambiental u otras autorizaciones?

.....

1.3.4. Descripción de denuncias ambientales, infracciones y/o multas:

.....

1.3.5. Descripción de accidentes o de emergencias ambientales:

.....

2. INFORMACIÓN TÉCNICA DE LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS

Presentación de la información técnica para cada actividad desarrollada en el sitio.

2.1. Información sobre los procesos productivos y de apoyo

¿Qué procesos productivos y de apoyo se desarrollaron en el sitio y dónde? Indicar su ubicación en el mapa.

.....

2.2. Componentes e instalaciones

¿Qué componentes o instalaciones principales de los procesos productivos existían y/o aún existen en el sitio? ¿Se encuentran todavía en funcionamiento? ¿Cómo es su estado actual? Indicar su ubicación en el mapa.

.....

¿Qué componentes o instalaciones de apoyo existían y/o aún existen en el sitio? ¿Se encuentran todavía en funcionamiento? ¿Cuál es su estado actual? Indicar su ubicación en el mapa. Ejemplos:

Casa de fuerza eléctrica / cabina primaria: ¿Existen/existían transformadores? Describir el estado de conservación del piso.

.....

Generador de electricidad: ¿Cuál es/ha sido la fuente de energía del generador de electricidad (combustible, gas, etc.)? En el caso de combustible: ¿Dónde se ubican/ubicaron los tanques de combustible? ¿Cuál es/ha sido el volumen de los tanques? Describir el estado de conservación del piso.

.....

Pozos / cisternas: ¿Existen/existían pozos o cisternas en el sitio? ¿Cuál es/ha sido su uso? Describir los pozos o las cisternas identificadas e indicar su ubicación en el mapa.

.....

1.3. Información sobre materias primas, insumos y productos.

¿Qué materias primas, insumos (por ejemplo combustibles) y/o sustancias se utilizan o utilizaron en el sitio? ¿Dónde se almacenaron y manejaron? ¿Se trata de materiales o sustancias con características peligrosas?

.....

¿Qué productos y subproductos se generan o generaron en el sitio? ¿Dónde se manejaron? ¿Se trata de productos con características peligrosas?

.....

¿Dónde y bajo qué condiciones de seguridad (por ejemplo existencia de pisos de concreto) se almacenan o almacenaron materias primas, insumos, subproductos y productos (peligrosos y no peligrosos)?

.....

Líquidos / combustibles: ¿Existen/existían recipientes como tanques de combustible, barriles, pozas o baños? Indicar su ubicación en el mapa, anexas fotografías y llenar la siguiente tabla:

Recipiente (tipo y volumen) ¿Qué líquido contiene/contenía? ¿Aún existe (sí/no)?

1.
2.
3.

2.4 Información sobre residuos, efluentes, emisiones y accidentes

Residuos: ¿Qué residuos (líquidos y sólidos) se generan o generaron en el sitio? ¿Dónde se manejaron? ¿Se trata de residuos con características peligrosas?

.....

¿Cómo se han tratado y destinado los residuos sólidos y las mermas de la producción? Indicar la ubicación en croquis, añadir fotografías.

.....

Efluentes: ¿Cómo han tratado y destinado efluentes y sobras líquidas de la producción? Indicar la ubicación en croquis, añadir fotografías.

.....

Accidentes: ¿Ocurrieron pérdidas accidentales de líquidos o explosiones? ¿Dónde?

.....

Emisiones atmosféricas: ¿Existen/existían chimeneas? ¿Salía humo de la fábrica?

.....

2.5 Observaciones que indican contaminación en el sitio

¿Existen manchas en el piso? Describir los hallazgos e indicar su ubicación en el mapa.

.....

¿Existen hallazgos en pozos, recipientes, alcantarillas, áreas de aguas vertidas, canaletas, tuberías con presencia de líquidos potencialmente nocivos o aceites con olor químico? Describir los hallazgos y marcar su ubicación en el mapa.

.....

2.6 Otras observaciones. Ejemplos:

¿Existen en el sitio usos sensibles como jardines de niños, huertos de plantas útiles o alimentarias, canchas de fútbol? Describir los usos sensibles.

.....

¿Los suelos del sitio están expuestos, cuentan con un sellado (pavimento, losas de concreto, etc.) o con cobertura vegetal (césped, etc.)? Describir los tipos de superficies. En el caso de suelos sellados: ¿existen grietas o fracturas que permiten infiltraciones al suelo? Indicar en el mapa los tipos de superficies encontradas.

.....

3. CROQUIS DEL SITIO Y DE LOS PROCESOS PRODUCTIVOS DISEÑO (*LAYOUT*) DE LA ACTIVIDAD

Conseguir una ampliación de una fotografía aérea de gran escala a campo para usarla como base de anotaciones sobre los componentes e instalaciones visitados y marcar en ella las áreas de disposición de residuos, depósitos/almacenes de materias primas, insumos y combustibles, instalaciones de tratamiento de efluentes, de abastecimiento de energía (generadores, transformadores), calderas y unidades de producción.

Elaborar sobre esta base un croquis con la ubicación de los componentes y las instalaciones actuales e históricas, la infraestructura y los hallazgos obtenidos durante la visita de campo.

ANEXO 6

Elementos orientadores para la evaluación preliminar

Son indicaciones que orientan la recolección y la sistematización de la información requerida para la evaluación preliminar (EP) del sitio potencialmente contaminado. Su uso permite presentar la información obtenida durante la EP de forma resumida en tablas y mapas.

ELEMENTO ORIENTADOR 1. Hechos históricos importantes

AÑO	HECHOS IMPORTANTES DEL DESARROLLO DE LAS ACTIVIDADES RELEVANTES PARA EL AMBIENTE	DOCUMENTO DE REFERENCIA
1968	Inicio de operaciones de fundición de la empresa Fondo Perú S. A. C.	Licencia autorizada por
1972	Ampliación de la planta; instalación de un segundo horno de reverbero	Licencia autorizada por
1986	Incendio en el almacén de combustibles	Reporte del Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú, Compañía Callao 15, del 1.6.1986
1990	Denuncia ambiental por contaminación del aire	Denuncia n.º 2348-XXX
1991	Cierre de operaciones de Fondo Perú S. A. C.	Registro n.º 4568 de la municipalidad XXX
1992	Inicio de operaciones de la empresa galvanoplástica Todo Brilla Perú S. A. C.	Licencia autorizada por
.....

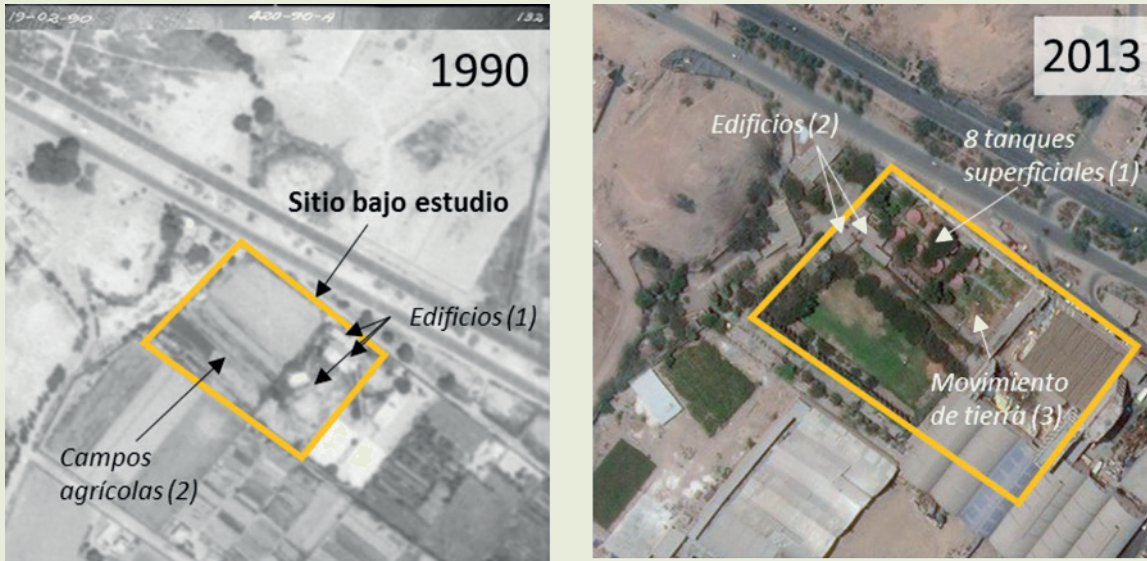
ELEMENTO ORIENTADOR 2. Información sobre los procesos productivos**Ejemplo: antigua planta galvanoplástica**

Unidades de procesos primarios	Materia prima	Productos y subproductos	Insumos combustibles	Residuos
Unidad del cromado en baños (pozas)	Piezas metálicas, soluciones de cromado (cromo VI)	Objetos metálicos cromados	Ácido clorhídrico	Efluentes líquidos del cromado. Ácidos agotados
Unidad de desengrase	Piezas metálicas	Objetos metálicos limpiados	Tricloroetileno	Solventes agotados
Generador de energía			Diésel	Aceites
Otros.....				

ELEMENTO ORIENTADOR 3. Documentación del análisis fotogramétrico**Ejemplo: presentación de los resultados del análisis fotogramétrico en una tabla**

N.º	Documento fotogramétrico	Fecha del sobrevuelo	Tipo de análisis	Observaciones / hallazgos
1	Fotografía aérea en blanco y negro, escala 1:6000; impresa en papel (23 x 23 cm) Fuente: Fuerza Aérea del Perú Fotografía n.º 420-66-A-132	19.02.1990	Análisis monoescópico	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3 edificios, usos no identificables (1) ▪ Campos agrícolas (2) ▪
2	Fotografías aéreas estereográficas en color, escala 1:6000; formato digital de alta resolución. Fuente: Instituto Geográfico Nacional Fotografía n.º 123-13-A-222 y -223	09.12.2013	Análisis estereoscópico	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 8 tanques superficiales (1) ▪ 2 edificios, usos no identificables (2) ▪ Zona de movimiento de tierra (3) ▪
	Otros.....			

Ejemplo: presentación de los resultados del análisis fotogramétrico en mapas ilustrativos



ELEMENTO ORIENTADOR 4. Potenciales fuentes de contaminación en el sitio

Identificación y ponderación de las potenciales fuentes primarias y secundarias de contaminación (en adelante: fuentes) en el sitio bajo estudio.

Categorías del nivel de evidencia

NIVEL DE EVIDENCIA	DESCRIPCIÓN
Confirmado +++	La fuente está comprobada y su existencia se infiere del análisis de los procesos productivos (diagrama de flujo + planos del diseño de la planta o de los componentes / instalaciones). Ejemplos: se pueden observar manchas en el piso y el local aparece en el plano de diseño de la planta (<i>layout</i>) como área de desengrase de metales.
Probable ++	La fuente se menciona solo en el diagrama de flujo o en los planos, pero no hay indicios en el campo que verifiquen su existencia.
Posible +/-	La fuente se cita a menudo en los documentos revisados, pero sin alguna mención específica. Ejemplo: la existencia de un local de desengrase se menciona en algunos documentos o en la entrevista, pero no aparece en el diagrama de flujo o en los planos de la planta.
Sin evidencia —	La evidencia sobre la existencia de la fuente es muy débil. Se menciona en los documentos solo como un componente planificado o previsto.

Fuentes potenciales y Cpl dentro del sitio

Ejemplo: antigua fundición y planta galvanoplástica

N.º en mapa	Fuente potencial	Contaminantes de potencial interés	Clasificación según evidencia
1	6 tanques superficiales de gasolina (58 m ³ cada uno)	BTEX e hidrocarburos de petróleo (F1 y F2)	+++ Existencia verificada en campo.
2	2 tanques superficiales de TCE (120 m ³ cada uno)	TCE	+++ Existencia verificada en campo.
3	5 tanques superficiales de diésel (de 58 m ³ , 120 m ³ , 180 m ³ y 220 m ³)	BTEX e hidrocarburos de petróleo (F1 y F2)	+++ Existencia verificada en campo.
4	Antigua casa de fuerza con transformadores	PCB	+++ Existencia verificada en campo.
5	Antigua bodega de fundición con dos hornos de reverbero (según plano)	Metales pesados, hidrocarburos poliaromáticos	++ Los hornos ya no existen, pero figuran en el plano de la planta y se notan restos de ellos en campo.
6	Montículos de residuos industriales (escorias)	Metales pesados	+++ Existencia verificada en campo.
7	Poza para el cromado de piezas metálicas	Cromo VI	++ Aún no existe, pero figura en el plano de la planta y se observa el fundamento de la poza en campo.
8	Poza para el cromado de piezas metálicas	Cromo VI	++ Aún no existe, pero figura en el plano de la planta y se observa el fundamento de la poza en campo.

N.º en mapa	Fuente potencial	Contaminantes de potencial interés	Clasificación según evidencia
9	3 tanques subterráneos	BTEX e hidrocarburos de petróleo (F1 y F2)	+/- Los tanques figuran en un plano del proyecto; en campo no se pudo verificar su existencia.
10	Montículos de residuos industriales (escorias)	Metales pesados, hidrocarburos poliaromáticos	+++ Existencia verificada en campo.
11	Taller para el mantenimiento de maquinarias	BTEX e hidrocarburos de petróleo (F1 y F2)	+++ Existencia verificada en campo.
12	Antiguo local para el desengrase de piezas metálicas	TCE	++ Aún no existe, pero figura en el plano de la planta.
13	Descarte superficial de escorias (residuos del proceso de fundición).	Metales pesados, hidrocarburos poliaromáticos	+++ Existencia verificada en campo.

ELEMENTO ORIENTADOR 5. Potenciales fuentes de contaminación fuera del sitio bajo estudio

Identificación y ponderación de las potenciales fuentes primarias y secundarias de contaminación (en adelante: fuentes) fuera del sitio bajo estudio.

N.º en mapa	Fuente potencial	Contaminantes de potencial interés	Clasificación según evidencia
XX	Estación de servicio (grifo)	Hidrocarburos, gasolina, benceno	+++
		

ELEMENTO ORIENTADOR 6. MAPA DE LAS POTENCIALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN Y DE LOS Cpl



ELEMENTO ORIENTADOR 7. Modelo conceptual del sitio inicial

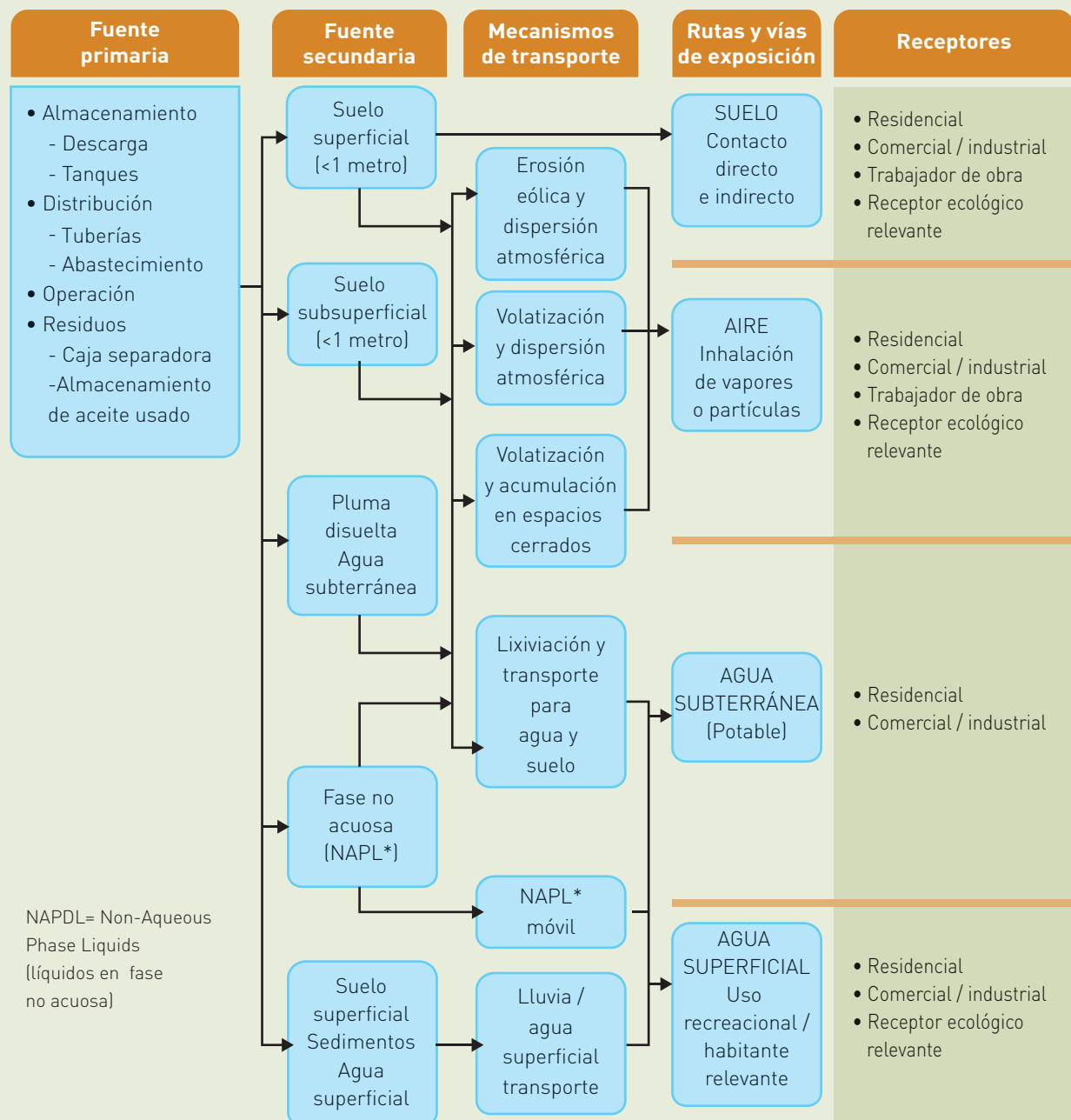
Ejemplo: antigua fundición y planta galvanoplastia

N.º en mapa	Fuentes primarias y secundarias	Rutas y vías de exposición	Contaminantes de potencial interés	Receptores
7	Poza para el cromado de piezas metálicas	Suelo, contacto directo	Cromo VI	Eventuales usuarios del acuífero, futuros trabajadores y usuarios del sitio.
		Agua subterránea		
12	Local de desengrase de piezas metálicas	Agua subterránea	TCE	Eventuales usuarios del acuífero.
		Fase gaseosa del suelo, inhalación de vapores		Futuros habitantes en ambientes cerrados.
13	Escorias (residuos del proceso de fundición) en suelo superficial	Suelo, contacto directo.	Metales pesados, hidrocarburos poliaromáticos	Trabajadores.
.....	

ANEXO 7

Modelos conceptuales de sitios contaminados

Ejemplo 1. MCS de una estación de servicio (grifo): tipo flujograma



Fuente: elaboración propia con base en CETESB, 2011.

Ejemplo 2. MCS inicial de contaminación con hidrocarburos: tipo perfil



Elaboración propia.

El presente ejemplo muestra el MCS inicial de una contaminación con hidrocarburos en el agua subterránea de una zona de uso mixto (industrial, residencial y agrícola) en Lima.

El antecedente de este caso es que en dos pozos de la zona residencial aparecieron hidrocarburos en fase libre. Los pozos se encuentran inmediatamente aguas abajo de una fábrica de pinturas. Esta fábrica utiliza para sus procesos productivos diferentes solventes orgánicos, entre otros hidrocarburos ligeros y, por eso, se ha considerado esta planta como una fuente potencial para la contaminación encontrada en los pozos.

En el MCS a continuación se ilustra un posible escenario de contaminación (= hipótesis). En este escenario, la fábrica representa la fuente de la contaminación. A raíz de algún evento no conocido, se infiltraron hidrocarburos en el suelo y generaron una contaminación del subsuelo y de las aguas subterráneas. Además, el MCS presenta otras posibles afectaciones, como la acumulación de vapores tóxicos o explosivos en ambientes cerrados de la zona residencial (casas, pozos, alcantarillas, etc.). Los símbolos de interrogantes «?» en el MCS indican que se trata de supuestos no confirmados, es decir, de rutas y vías de exposición potenciales.

En el presente caso se utilizó el MCS para la planificación de las acciones de muestreo, el cual tenía la finalidad de verificar o descartar las hipótesis sobre el origen y la extensión de la contaminación, y acerca de los riesgos asociados a ella para las personas y/o para el ambiente.

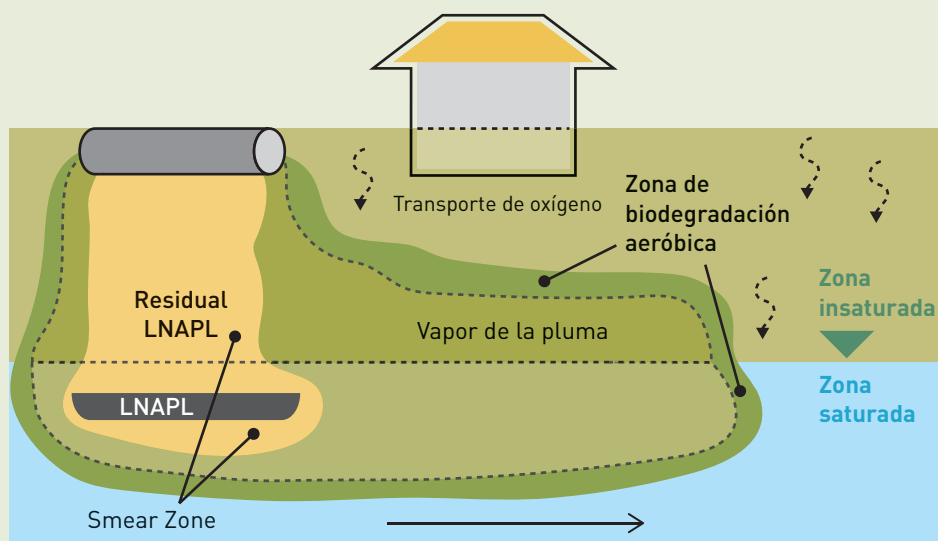
Ejemplo 3. MCS de contaminación del suelo con arsénico: tipo fotografía



Elaboración propia.

El presente ejemplo muestra una contaminación del suelo con arsénico generada por afloramientos de aguas de formación provenientes de un pozo petrolero mal abandonado. En este caso, se elaboró el MCS con base en una fotografía que indica la zona contaminada (suelos de color amarillo-verde) y los usos del entorno que permiten identificar de forma preliminar las potenciales rutas y vías de exposición, así como a los receptores potencialmente expuestos a la contaminación, como los niños del colegio o la población del pueblo aledaño.

Ejemplo 4. MCS típico del transporte de hidrocarburos de petróleo: tipo perfil



LNAPL (light nonaqueous phase liquid): líquidos ligeros de fase no acuosa

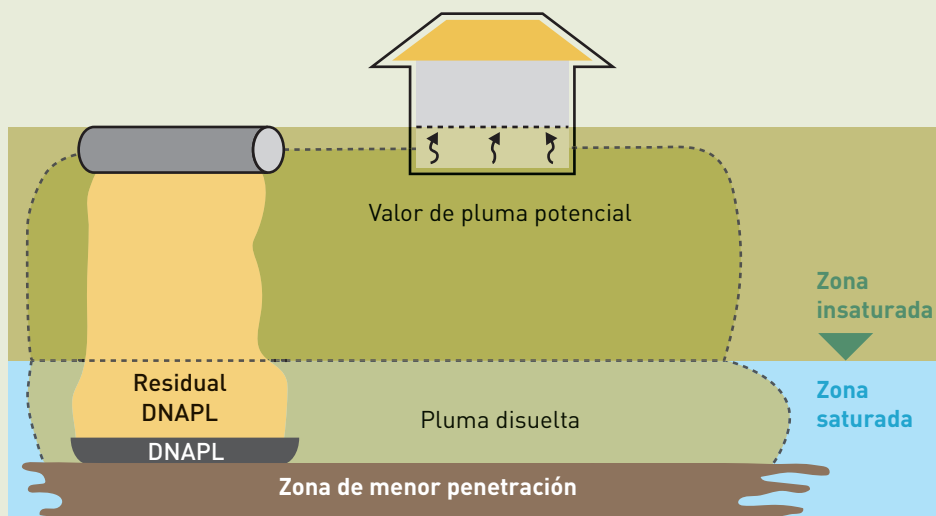
Fuente: US EPA, 2012.

Este ejemplo muestra el uso de un MCS para graficar los procesos que ocurren típicamente en el transporte de hidrocarburos en el subsuelo y en las aguas subterráneas.

El texto descriptivo al respecto es el siguiente:

La biodegradación aeróbica de los hidrocarburos de petróleo a lo largo del perímetro de la pluma de vapor y la pluma disueltas limita la difusión de contaminantes en el subsuelo. El transporte de oxígeno efectivo (flechas discontinuas) mantiene las condiciones aeróbicas en la zona de biodegradación. Los LNAPL (líquidos ligeros de fase no acuosa) del petróleo se acumulan en la franja capilar entre las zonas saturadas y no saturadas.

Ejemplo 5. MCS típico del transporte de solventes clorados: tipo perfil



DNALP (Dense nonaqueous phase liquid): Líquidos densos de fase no acuosa

Fuente: US EPA, 2012.

Este ejemplo muestra el uso de un MCS para graficar los procesos que ocurren típicamente en el transporte de solventes organoclorados en el subsuelo y en las aguas subterráneas.

El texto descriptivo al respecto es el siguiente:

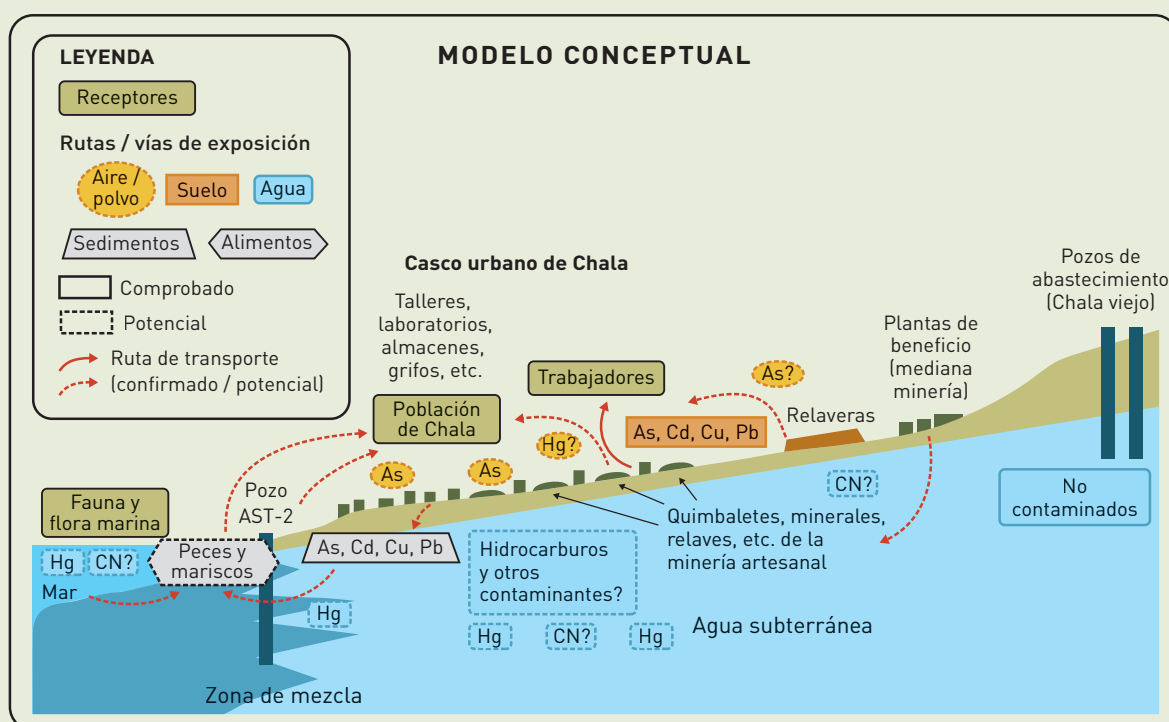
La biodegradación de los disolventes clorados es anaeróbica y por lo general más lenta que la biodegradación de los derivados del petróleo, de modo que el vapor y las plumas disueltas a menudo migran más lejos que las plumas de los derivados del petróleo. Los disolventes clorados pueden migrar como una pluma de DNAPL. Estos pueden caer por debajo del nivel freático, acumulándose en este caso sobre una capa menos permeable.

Ejemplo 6. MCS de una contaminación con residuos peligrosos en un sitio industrial al lado de un área residencial / recreativa: tipo dibujo en 3D



Fuente: elaborado con base en Marker, 2012.

Ejemplo 7. MCS de la contaminación y los potenciales impactos a la salud humana y el ambiente causados por actividades mineras en Chala, Arequipa: tipo perfil



Fuente: MINAM *et al.*, 2016a.

ANEXO 8

Presentación de los resultados de muestreo: formato

Ejemplo de llenado del cuadro.

CLAVE (ID) DE LA MUESTRA	TIPO DE MUESTRA	FECHA DE MUESTREO	PROF. (metros)	COORDENADAS UTM		
				ESTE	NORTE	ZONA
OS-S-002-0,3m	Simple	15/01/2018	0,0-0,3	623 118	2 463 439	18 SUR
OS-S-001-0,3m	Simple	15/01/2018	0,0-0,3	622 822	2 463 609	18 SUR
OS-S-001-1,0m	Simple	15/01/2018	0,3-1,0	622 822	2 463 609	18 SUR
OS-S-001-2,0m	Simple	15/01/2018	1,0-2,0	622 822	2 463 609	18 SUR
OS-S-001-2,0m dup.	Simple	15/01/2018	1,0-2,0	622 822	2 463 609	18 SUR
OS-S-002-0,1m	Simple	15/01/2018	0,0-0,1	622 051	2 461 446	18 SUR
ECA para suelo: uso industrial						

CLAVE (ID) DE LA MUESTRA	CONCENTRACIÓN (mg/kg)						
	HTP-F1	HTP-F2	HTP-F3	B	T	EB	X
OS-S-002-0,3m	< 0,01	76	120	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,1
OS-S-001-0,3m	< 0,01	120	2200	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,1
OS-S-001-1,0m	150	5830	8700	0,75	< 0,01	< 0,01	< 0,1
OS-S-001-2,0m	260	9100	5750	0,60	< 0,01	< 0,01	< 0,1
OS-S-001-2,0m dup.	270	8900	5800	0,80	< 0,01	< 0,01	< 0,1
OS-S-002-0,1m	< 0,01	53	70	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,1
ECA para suelo: uso industrial	500	5000	6000	0,03	0,37	0,082	11

Elaboración propia.
ECA para suelo: uso industrial

LEYENDA

OS	Abreviatura de la localidad	HTP-F2	Fracción de hidrocarburos F2
S	Muestra de suelo	HTP-F3	Fracción de hidrocarburos F3
PS	Peso seco	B	Benceno
Prof.	Profundidad	T	Tolueno
Dup.	Duplicado	EB	Etilbenceno
HTP-F1	Fracción de hidrocarburos F1	X	Xilenos

ANEXO 9

Orientaciones para el levantamiento topográfico

Comprende la geolocalización con GPS y otros equipos geodésicos de alta precisión para la elaboración de planos georreferenciados en coordenadas UTM, en los que se señale los puntos de muestreo (perforaciones) que resulten necesarios para determinar el volumen del suelo contaminado y la profundidad de excavación. Debe incluir al menos lo siguiente:

1. Trazo y nivelación basados en equipos topográficos para establecer ejes y referencias permanentes, debiéndose marcar referencias horizontales y verticales a nivel superficial.
2. La unidad de medida es el metro.
3. Se utilizará el sistema de coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator), y el sistema geodésico WGS 84 (World Geodetic System 84).
4. La utilización del equipo GPS de alta precisión en el sitio debe estar incluida en la memoria fotográfica del sitio.
5. El levantamiento debe estar ligado a la red geodésica nacional del Instituto Geográfico Nacional.
6. Un banco de nivel en el sitio con GPS de alta precisión.
7. Ubicación en planos de:
 - ◆ La infraestructura del sitio
 - ◆ La trayectoria de ductos, estructuras subterráneas (en caso existir)
 - ◆ Colindancias y vías de comunicación aledañas
 - ◆ Identificación de áreas contaminadas
 - ◆ Curvas de nivel
 - ◆ Establecimientos de banco de nivel y puntos de control al interior y fuera del predio
 - ◆ Puntos de muestreo
 - ◆ Modelos de distribución horizontal de la contaminación con hidrocarburos y otros contaminantes
8. En la elaboración de planos con programas CAD (por su sigla en inglés *Computer Assisted Design*), como Autocad, se deberá considerar lo siguiente:
 - ◆ Los planos no deben moverse de su origen.
 - ◆ Los planos no deben estar escalados.
 - ◆ Los planos (en particular el modelo) no deben estar rotados.

- ◆ Los ejes de los planos (en particular el modelo) no deben estar rotados.
- ◆ Los planos deben ser coincidentes en escala y forma con las fotografías aéreas.
- ◆ Se deberá entregar un plano por separado exclusivamente con el límite del predio como polilínea cerrada.

Se deberán entregar los planos de edificaciones y estructuras por tipo (cada tipo de estructura en una capa, por ejemplo en una capa calles, en otra capa edificios, en otras capas drenajes) como polilíneas cerradas.

ANEXO 10

Matriz para el análisis de alternativas de remediación

CRITERIO / SUBCRITERIO	META	PONDERACIÓN	ESCALA
CRITERIO 1: ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS DISPONIBLES		60 %	
Subcriterio 1.1 Aptitud de la tecnología / técnica con respecto a los contaminantes, tipos de suelos, materiales y características del sitio	Determinar una tecnología / técnica de remediación que sea idónea con respecto a los contaminantes, el tipo de suelos, los materiales y las características del sitio; disminuir el riesgo técnico.	10 %	0 = Técnica innovadora (no es la técnica óptima actual). 1 = Técnica óptima actual pero con pocas experiencias en casos parecidos. 2 = Técnica óptima actual con experiencias positivas en casos parecidos, pero su éxito depende mucho de las características específicas del sitio. 3 = Técnica óptima actual con muchas experiencias positivas en sitios parecidos. 4 = Técnica óptima actual cuyo éxito es por lo general independiente de las características específicas del sitio.
Subcriterio 1.2 Eficacia con respecto al objetivo de la remediación	Máxima eficacia con respecto al objetivo de la remediación.	25 %	0 = Sitio remediado alcanza los objetivos de remediación. 1 = Sitio remediado supera los objetivos de remediación. 2 = Sitio remediado supera de manera amplia los objetivos de remediación.
Subcriterio 1.3 Impactos en las personas que se encuentran en el área de influencia	Disminuir los impactos en las personas que se encuentran en el área de influencia de la remediación; como impactos se entienden contaminación acústica, polvos, perturbación del tráfico y otras molestias causadas por las acciones de remediación.	5 %	0 = Considerables impactos. 1 = Impactos parecidos a los de las obras de construcción según la costumbre local. 2 = Sin impactos relevantes.

CRITERIO / SUBCRITERIO	META	PONDERACIÓN	ESCALA
Subcriterio 1.4 Requerimiento de autorizaciones relacionadas con la ejecución de las acciones de remediación	Disminuir el requerimiento de autorizaciones relacionadas con la ejecución de las acciones de remediación.	2 %	0 = Necesidad de involucrar a más de cinco autoridades administrativas. 1 = Necesidad de involucrar a de tres a cinco autoridades administrativas. 2 = Necesidad de involucrar a, como máximo, dos autoridades administrativas.
Subcriterio 1.5 Requerimientos de medidas de salud y seguridad ocupacional	Disminuir los requerimientos de medidas de salud y seguridad ocupacional; minimizar los riesgos para los trabajadores de las obras de remediación.	8 %	0 = Se requieren exigentes medidas de higiene y seguridad ocupacional. 1 = Se requieren medidas de higiene y seguridad ocupacional, parecidas a las de las obras de construcción civil. 2 = Se requieren medidas básicas de higiene y seguridad ocupacional.
Subcriterio 1.6 Necesidad de ejecutar acciones complementarias después de la remediación	Minimizar la necesidad de ejecutar acciones complementarias después de la remediación.	10 %	0 = Hay necesidad de acciones complementarias. 1 = Hay limitada necesidad de acciones complementarias. 2 = No hay necesidad de acciones complementarias.
CRITERIO 2: ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD DE LAS ALTERNATIVAS		20 %	
Subcriterio 2.1 Necesidad de seguimiento de las medidas de remediación	Disminuir la necesidad de seguimiento de las medidas de remediación.	5 %	0 = Se requieren medidas extensas de seguimiento (por ejemplo por largo tiempo). 1 = Se requieren medidas de seguimiento. 2 = No se requieren medidas de seguimiento.
Subcriterio 2.2 Capacidad de vigilancia / monitoreo del sitio remediado (de ser necesario)	Conservar la capacidad de vigilancia / monitoreo del sitio remediado.	5 %	0 = No hay la posibilidad de vigilar / monitorear el sitio remediado. 1 = Las posibilidades de vigilancia / monitoreo son limitadas. 2 = No hay limitaciones relevantes para la vigilancia / monitoreo del sitio remediado, o no es necesario.
Subcriterio 2.3 Duración de las medidas con respecto a la alternativa más eficiente	Disminuir la duración de las medidas de remediación con respecto a la alternativa más eficiente.	10 %	Escala relativa, determinación en comparación con las otras técnicas propuestas. 0 = Duración mayor. 1 = Duración intermedia. 2 = Duración menor.

CRITERIO / SUBCRITERIO	META	PONDERACIÓN	ESCALA
CRITERIO 3: ANÁLISIS DE ECOEFICIENCIA DE LAS MEDIDAS PROPUESTAS		20 %	
Subcriterio 3.1 Generación y eliminación de residuos (durante la remediación)	Disminuir la generación y la necesidad de eliminar residuos; en este caso no se cuenta como residuos los suelos o materiales redepositados en el sitio; criterio relativo en comparación con las otras técnicas.	2 %	Escala relativa, determinación en comparación con las otras técnicas propuestas. 0 = Se genera alta cantidad de residuos. 1 = Se genera mediana cantidad de residuos. 2 = Se generan poca cantidad / nada de residuos.
Subcriterio 3.2 Aprovechamiento de residuos (durante la remediación)	Maximizar el aprovechamiento de residuos; en este caso no se cuenta como residuos los suelos o los materiales redepositados en el sitio.	3 %	Escala relativa, determinación en comparación con las otras técnicas propuestas. 0 = La tasa de aprovechamiento es alta o se generan poco / nada de residuos. 1 = La tasa de aprovechamiento es mediana. 2 = La tasa de aprovechamiento es poca / no hay aprovechamiento de residuos.
Subcriterio 3.3 Consumo de energía	Disminuir el consumo de energía; criterio relativo en comparación con las otras técnicas.	5 %	Escala relativa, determinación en comparación con las otras técnicas propuestas. 0 = El consumo de energía es alto. 1 = El consumo de energía es mediano. 2 = El consumo de energía es bajo.
Subcriterio 3.4 Generación de gases de efecto invernadero (GEI): dióxido de carbono (CO ₂) y metano (CH ₄)	Disminuir la generación de GEI.	5 %	Escala relativa, determinación en comparación con las otras técnicas propuestas. 0 = La generación de GEI es alta. 1 = La generación de GEI es mediana. 2 = La generación de GEI es baja.
Subcriterio 3.5 Consumo de recursos naturales: por ejemplo agua o suelo	Disminuir el consumo de recursos naturales.	5 %	Escala relativa, determinación en comparación con las otras técnicas propuestas. 0 = El consumo de recursos naturales es alto. 1 = El consumo de recursos naturales es mediano. 2 = El consumo de recursos naturales es bajo.

Ejemplo

Contaminación del suelo con hidrocarburos hasta 5 metros de profundidad y contaminación secundaria de las aguas subterráneas con BTEX (ver también las ilustraciones a continuación).

Alternativa 1: excavación completa del suelo contaminado, atenuación natural de la contaminación en las aguas subterráneas.

Alternativa 2: excavación superficial del suelo contaminado, contención de la contaminación más profunda con muralla de baja permeabilidad, atenuación natural de la contaminación en las aguas subterráneas.

Alternativa 3: excavación superficial del suelo contaminado, bombeo y tratamiento de la contaminación en las aguas subterráneas.

A continuación se presenta un ejemplo para el llenado de la matriz.

MATRIZ PARA EL ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN			EJEMPLOS					
			PUNTOS SEGÚN ESCALA			PUNTOS PONDERADOS		
CRITERIO / SUBCRITERIO	PONDERACIÓN (%)	PUNTOS MÁX.	ALTERNATIVA1	ALTERNATIVA2	ALTERNATIVA3	ALTERNATIVA1	ALTERNATIVA2	ALTERNATIVA3
CRITERIO 1: ANÁLISIS DE LAS TECNOLOGÍAS DISPONIBLES								
Subcriterio 1.1.: la aptitud de la tecnología / técnica con respecto a los contaminantes, tipos de suelos, materiales y características del sitio	10	4	4	3	3	10,0	7,5	7,5
Subcriterio 1.2.: la eficacia con respecto al objetivo de la remediación	25	2	2	0	0	25,0	0,0	0,0
Subcriterio 1.3.: impactos en las personas que se encuentran en el área de influencia	5	2	2	1	1	5,0	2,5	2,5
Subcriterio 1.4.: requerimiento de autorizaciones relacionadas con la ejecución de las acciones de remediación	2	2	2	1	0	1,0	1,0	0,0
Subcriterio 1.5.: requerimientos de medidas de salud y seguridad ocupacional	8	2	2	1	1	0,0	4,0	4,0
Subcriterio 1.6.: necesidad de ejecutar acciones complementarias después de la remediación	10	2	2	1	0	10,0	5,0	0,0
CRITERIO 2: ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD DE LAS ALTERNATIVAS								
Subcriterio 2.1.: necesidad de seguimiento de las medidas de remediación	5	2	2	1	0	5,0	2,5	0,0
Subcriterio 2.2.: capacidad de vigilancia / monitoreo del sitio remediado (de ser necesario)	5	2	2	1	1	5,0	2,5	2,5
Subcriterio 2.3.: duración de las medidas con respecto a la alternativa más eficiente	10	2	0	2	1	0,0	10,0	5,0

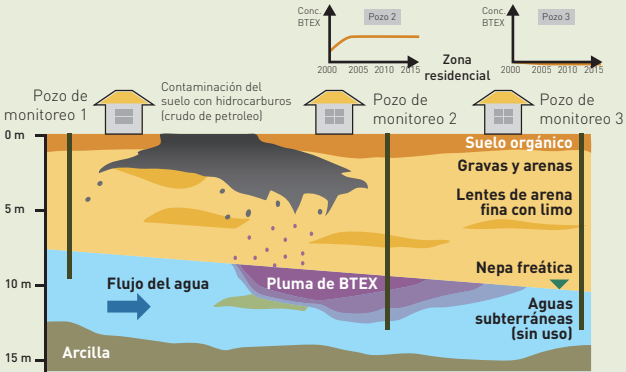
MATRIZ PARA EL ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN			EJEMPLOS					
			PUNTOS SEGÚN ESCALA			PUNTOS PONDERADOS		
CRITERIO / SUBCRITERIO	PONDERACIÓN (%)	PUNTOS MÁX.	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
CRITERIO 3: ANÁLISIS DE ECOEFICIENCIA DE LAS MEDIDAS PROPUESTAS								
Subcriterio 3.1.: generación y eliminación de residuos (durante la remediación)	2	2	0	2	1	0,0	2,0	1,0
Subcriterio 3.2.: aprovechamiento de residuos (durante la remediación)	3	2	2	0	1	3,0	0,0	1,5
Subcriterio 3.3.: consumo de energía	5	2	0	2	1	0,0	5,0	2,5
Subcriterio 3.4.: generación de GEI: dióxido de carbono (CO ₂) y metano (CH ₄)	5	2	0	1	2	0,0	2,5	5,0
Subcriterio 3.5.: consumo de recursos naturales: por ejemplo agua o suelo	5	2	0	2	1	0,0	5,0	2,5

Elaboración propia.

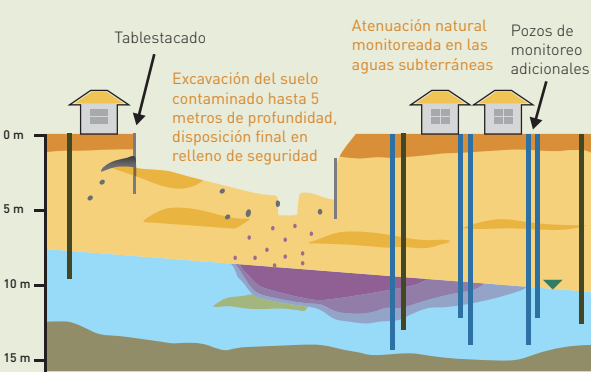
En este ejemplo la alternativa 1 resulta la más idónea

Suma	54,0	49,5	34,0
------	------	------	------

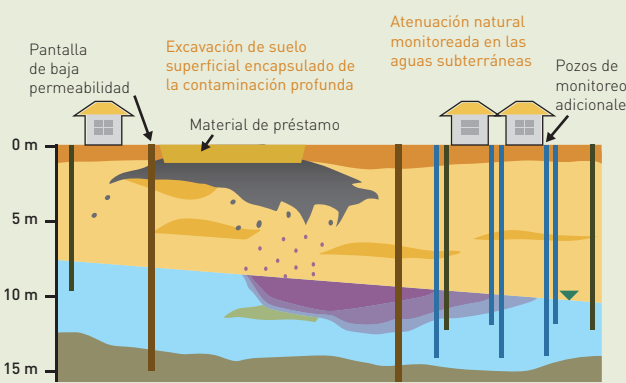
Ejemplo: escenario de contaminación



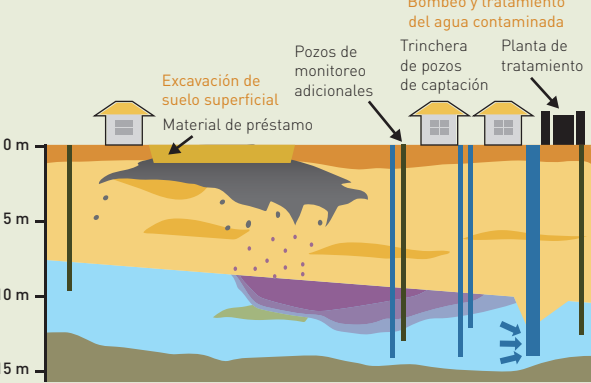
Alternativa de remediación 1



Alternativa de remediación 2



Alternativa de remediación 3





PERÚ

Ministerio
del Ambiente