

Master en Ingeniería y Gestión Medioambiental 2007/2008

Módulo: Contaminación de Suelos y Aguas Subterráneas

INVESTIGACIÓN DE ESPACIOS CONTAMINADOS

AUTOR: ALFONSO AGUILAR PEÑA



Índice

1. INTRODUCCIÓN	3
2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
3. ESTRATEGIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
4. CARACTERIZACIÓN INICIAL	3
4.1 ESTUDIO HISTÓRICO	3
4.2 ESTUDIO DEL MEDIO FÍSICO	3
4.3 INSPECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO	3
4.4 MODELO CONCEPTUAL DEL EMPLAZAMIENTO	3
5. CARACTERIZACIÓN ANALÍTICA Y DETALLADA.....	3
5.1 INTRODUCCIÓN.....	3
5.2 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA	3
5.3 TOMA DE MUESTRAS PARA EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN.....	3
5.4 PREPARACIÓN, CONSERVACIÓN Y TRANSPORTE DE MUESTRAS	3
5.5 ANÁLISIS IN SITU	3
5.6 ESTRATEGIA ANALÍTICA	3
6. MEDIDAS DE SEGURIDAD	3
7. EVALUACIÓN Y DOCUMENTACIÓN DE RESULTADOS.....	3
8. CONTROL DE CALIDAD.....	3
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	3
10. BIBLIOGRAFÍA	3
10.1 DOCUMENTOS.....	3
10.2 DIRECCIONES EN INTERNET	3

ANEXOS:

Anexo 1: Sistemas de perforación y sus aplicaciones

Anexo 2: Diagramas esquemáticos de pozos de control

Anexo 3: Modelos de localización de puntos de muestreo en suelos

Anexo 4: Criterios para la selección de equipos de muestreo

Anexo 5: Recomendaciones sobre materiales de envasado y conservación de muestras en campo

Anexo 6: Fotografías



1. INTRODUCCIÓN

La casuística de la contaminación del suelo y las aguas subterráneas es diversa (deficiente gestión de residuos, materias primas y/o productos en instalaciones industriales, vertido de residuos sólidos y líquidos en condiciones inadecuadas, accidentes, etc.) y supone a menudo un problema ambiental difícil de diagnosticar y solucionar.

La **investigación de la contaminación del suelo y las aguas subterráneas de un emplazamiento** puede entenderse, en sentido amplio, como el conjunto de labores a desarrollar para obtener la información necesaria para diagnosticar la problemática del emplazamiento. Tal problemática puede hacer referencia a distintos aspectos: riesgos que plantea el emplazamiento para la salud humana y el medio ambiente, repercusiones de carácter legal y económico derivadas de la contaminación, pérdida de valor del emplazamiento como consecuencia de la contaminación existente, etc.

Las labores de investigación tienen cabida en varias de las fases de una estrategia genérica para la recuperación de un espacio contaminado: el diagnóstico de la naturaleza y alcance de la contaminación previo a la puesta en práctica de acciones de recuperación o de control, el análisis de alternativas de recuperación, la evaluación de la efectividad de las actuaciones de recuperación desarrolladas en un emplazamiento o el control y seguimiento ambiental de un emplazamiento.

En todo caso, el enfoque y contenido del programa de investigación de un emplazamiento están absolutamente condicionados por los objetivos de dicha investigación.

2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación de espacios contaminados constituye un medio y no un fin en sí misma. Los **objetivos primarios** más usuales a los que responden los trabajos de investigación son los siguientes:

- Determinar los riesgos para la salud humana y el medio ambiente derivados de la contaminación del suelo en un emplazamiento: origen, tipología y distribución espacial de la contaminación, mecanismos y vías de migración de los contaminantes, presencia y características de los receptores humanos y ecológicos.
- Obtener los datos necesarios para evaluar alternativas y seleccionar las mejores tecnologías de recuperación de un emplazamiento contaminado.
- Evaluar la efectividad de las medidas de recuperación puestas en práctica en un emplazamiento contaminado.
- Realizar el control y seguimiento de un emplazamiento que no requiere medidas de recuperación.

Estos objetivos primarios pueden responder a diversos **objetivos últimos**, entre los que son habituales los siguientes:



- Obtener información que permita establecer prioridades de actuación sobre los emplazamientos contaminados existentes en un ámbito territorial determinado (municipio, Comunidad Autónoma, activos de una empresa, etc.).
- Evaluar el grado en que un emplazamiento cumple la legislación vigente en lo relativo a la calidad del suelo y las aguas subterráneas o en qué medida dicha calidad permite determinados usos del suelo.
- Mejorar la gestión ambiental de una instalación potencialmente contaminante que se encuentra en activo.
- Determinar responsabilidades (administrativas, penales, etc.) derivadas de la contaminación del suelo de un emplazamiento.
- Determinar el “pasivo ambiental” de un emplazamiento: valoración económica de la huella ambiental del emplazamiento (habitualmente centrada en la contaminación del suelo y las aguas subterráneas), que se suele llevar a cabo en el marco de una operación de compra-venta del mismo.

Así pues, la finalidad última de la investigación puede ser diversa, condicionando en gran medida la orientación y el contenido de los trabajos a efectuar dentro de la misma. A continuación se desarrolla una exposición genérica de la estrategia y contenido de un programa de investigación de un emplazamiento, incidiendo particularmente en el caso de que tenga por objetivo evaluar los riesgos para la salud humana y el medio ambiente derivados de la contaminación del emplazamiento.

3. ESTRATEGIA DE LA INVESTIGACIÓN

Los trabajos de investigación constituyen la principal fuente de información para efectuar el diagnóstico, por lo que la validez de sus resultados depende en buena medida de la calidad con que se ha ejecutado la investigación.

Si bien no es posible definir en detalle una estrategia aplicable a la investigación de cualquier emplazamiento contaminado, se pueden mencionar algunos **aspectos clave** a tener presentes a la hora de diseñar aquella y el contenido de los trabajos:

- ♦ La estrategia debe ser **coherente con los objetivos** del estudio en que se encuadra.
- ♦ Los trabajos (y en consecuencia la estrategia a adoptar) suelen estar condicionados por **limitaciones temporales** (plazo de ejecución de los mismos) y **operativas** (disponibilidad de técnicas y equipos, restricciones impuestas por las características del emplazamiento, por sus propietarios u operadores, etc.).
- ♦ El diseño del programa de investigación debe perseguir la **optimización de los recursos económicos** destinados al mismo, de modo que se obtenga la máxima información útil al menor coste posible.

La experiencia ha demostrado que, siempre que otros condicionantes no lo impidan, resulta

ventajoso adoptar un **planteamiento secuencial**. Ello se traduce en el diseño y ejecución de los trabajos por fases, de modo que al término de cada una de ellas se realiza una evaluación de la información obtenida, estimándose si es necesario o no, y en caso afirmativo, hasta que punto y en que aspectos es preciso ampliar la investigación durante una fase posterior.

Este es el enfoque que recogen numerosas normas o recomendaciones elaboradas en varios países para orientar la ejecución de este tipo de trabajos. Un ejemplo de estas recomendaciones son las "*Guías temáticas*" editadas en 2004 por la Comunidad de Madrid sobre diversos aspectos relativos a la problemática de los suelos contaminados. En ellas se establece que el diagnóstico de un emplazamiento potencialmente contaminado debe ajustarse, en general, al siguiente proceso y fases de investigación (ver Figura 1):

- 1) La **Investigación Preliminar**, dividida a su vez en dos etapas diferenciadas:
 - La **Caracterización Inicial** (orientada a evaluar la posibilidad de existencia de contaminación en el emplazamiento) se compone de un estudio histórico, un estudio del medio físico y una inspección del emplazamiento, tareas que deben concluir con la elaboración de un modelo conceptual inicial. El modelo conceptual inicial debe permitir responder a la pregunta de si existen o no indicios de afección de la calidad del suelo del emplazamiento. En general, cuando se considere que no existen tales indicios, se dará por finalizado el proceso, no requiriéndose actuaciones posteriores. Cuando el modelo conceptual inicial revela indicios de afección de la calidad del suelo se procede a ejecutar la etapa de Caracterización Analítica.
 - La **Caracterización Analítica** (orientada a confirmar o desechar la presencia de contaminación significativa) tiene por objeto proceder a un primer muestreo y análisis químico sistemático de los medios que, de acuerdo con el modelo conceptual inicial del emplazamiento, puedan encontrarse afectados (suelo, aguas subterráneas, aguas superficiales, etc.). Los resultados de la Caracterización Analítica deben permitir establecer si existe o no una afección significativa de alguno de los medios implicados. A tal efecto, se considera que existe afección significativa cuando se superan los correspondientes Criterios Orientativos de Calidad del Suelo (COCS). Cuando, habiéndose identificado una afección, se concluye que ésta no es significativa, como norma general deberán ponerse en práctica medidas de control y seguimiento del emplazamiento, previa elaboración del correspondiente Plan de Control y Seguimiento Ambiental.

Si los resultados de la Investigación Preliminar indican que existe una afección significativa de la calidad del suelo del emplazamiento, existen dos posibilidades de actuación:

- a) Acometer una Investigación Detallada, cuyos resultados determinarán si es necesario poner en práctica medidas de recuperación y/o de control y seguimiento del emplazamiento.
- b) Acometer la recuperación del emplazamiento mediante la descontaminación de los medios afectados hasta concentraciones acordes con los COCS aplicables.

- 2) La **Investigación Detallada** (orientada a recopilar datos suficientes para abordar un análisis de riesgos) se inicia con las tareas encuadradas en la denominada **Caracterización Detallada**. Esta comienza con la revisión del modelo conceptual inicial a la luz de todos los datos obtenidos durante la Investigación Preliminar. El modelo conceptual revisado constituye la base sobre la que diseñar el resto de los trabajos de esta fase: la toma de muestras y análisis químicos exhaustivos que permitan delimitar espacial y temporalmente la contaminación y la obtención de otros datos necesarios para elaborar el análisis de riesgos (parámetros determinantes de la distribución de los contaminantes en distintos medios y de la migración de aquéllos a través de los mismos, parámetros que caracterizan la exposición de los receptores potenciales, etc.).

El análisis de riesgos constituye la herramienta clave para la toma de decisiones en esta fase. Si sus conclusiones indican que los niveles de riesgo son aceptables, no será preciso acometer actuaciones de recuperación del emplazamiento, aunque sí llevar a cabo un control y seguimiento del mismo, previa elaboración del correspondiente Plan de Control y Seguimiento Ambiental. Si, por el contrario, los niveles de riesgo no son aceptables, será preciso acometer actuaciones de recuperación del emplazamiento, cuyos objetivos deben establecerse como colofón de la Investigación Detallada y, en definitiva, del diagnóstico del emplazamiento.

Si el diagnóstico indica la necesidad de implantar medidas de recuperación, la definición detallada de las mismas ha de ir precedida de una evaluación de las alternativas disponibles para alcanzar los objetivos preestablecidos. En algunos casos, la evaluación de ciertas soluciones de recuperación requiere obtener datos del emplazamiento que no eran cruciales para el diagnóstico pero sí lo son para garantizar la aplicabilidad y viabilidad de determinadas tecnologías. En tales casos, tiene lugar la **Caracterización Complementaria**, que puede incluir ensayos de campo, toma de muestras y análisis, ensayos de tratabilidad en laboratorio, pruebas piloto de tratamiento, etc.

Una vez seleccionada la alternativa de recuperación que se considera óptima para las condiciones del emplazamiento y demostrada su viabilidad técnica, económica y ambiental, sus características deben documentarse en el denominado **Proyecto de Recuperación**. El Proyecto de Recuperación consta, como mínimo, de un Proyecto Técnico que describe las obras, instalaciones, condiciones de operación, medidas de seguridad, plazos y costes previstos para el conjunto de actuaciones de recuperación. En los casos preceptivos, el Proyecto de Recuperación incluirá, además, un Estudio de Impacto Ambiental.

Algunas soluciones de recuperación (por ejemplo, las basadas en disminuir los niveles de exposición mediante contención de los contaminantes in situ) exigen llevar a cabo un control y seguimiento del emplazamiento una vez concluida la implantación de las mismas. En tal caso, el Proyecto de Recuperación incluirá un Plan de Control y Seguimiento Ambiental del emplazamiento.

La implantación de las medidas de recuperación proyectadas siempre debe ir acompañada de la sistemática comprobación de la efectividad de las mismas. Cuando no se precise el posterior control y seguimiento del emplazamiento, tal comprobación dará lugar a la finalización del proceso. Cuando el emplazamiento esté sometido a control y seguimiento, la comprobación de que se cumplen las condiciones establecidas a tal efecto en el **Plan de Control y**



Seguimiento Ambiental permitirá dar por finalizado el proceso.

Aunque no tienen un reflejo explícito en el esquema, es frecuente acometer actuaciones de emergencia en un emplazamiento a lo largo de su diagnóstico, con el fin de paliar situaciones de riesgo evidente y/o inmediato (fuga de productos de sus recintos de contención, presencia de condiciones explosivas en conducciones, migración de volátiles o gases a entornos habitados, etc.). Tales actuaciones constituyen de hecho medidas de recuperación, si bien normalmente no son suficientes para resolver el problema en su totalidad, por lo que requieren complementarse con otras actuaciones diseñadas una vez finalizado el diagnóstico. Siempre que se lleven a cabo actuaciones de emergencia, sus efectos deben reflejarse en el modelo conceptual, con el fin de que el diagnóstico y el diseño de las actuaciones complementarias de recuperación y/o control y seguimiento se ajusten a las condiciones reales del caso.

La *Guía de Investigación de la Calidad del Suelo* y la *Guía de Análisis de Riesgos para la Salud Humana y los Ecosistemas* contienen recomendaciones acerca de cómo efectuar los distintos trabajos, dependiendo además el enfoque de algunos de ellos de la información disponible acerca de las supuestas causas de la contaminación (origen conocido o desconocido, fuentes puntuales o dispersas, etc.).

En los siguientes capítulos se desarrollan los aspectos básicos de los trabajos habitualmente incluidos en la Caracterización Inicial, la Caracterización Analítica y la Caracterización Detallada.

4. CARACTERIZACIÓN INICIAL

La optimización de los resultados de un programa de investigación de un emplazamiento aconseja recopilar la mayor información ya elaborada que sea posible en las etapas preliminares, dado que habitualmente la obtención de aquella es mucho menos costosa que su elaboración ex profeso.

En esta línea se orientan los trabajos encuadrados en la Caracterización Inicial, que habitualmente se estructuran en los siguientes:

- ◆ **El Estudio histórico.**
- ◆ **El Estudio del medio físico.**
- ◆ **La Inspección del emplazamiento.**
- ◆ **La elaboración del Modelo Conceptual Inicial.**

4.1 Estudio histórico

El estudio histórico persigue conocer en profundidad la evolución cronológica de los usos del suelo en el emplazamiento hasta el momento presente y su interrelación con las posibles alteraciones de la calidad del mismo, todo ello con los siguientes **objetivos**:



- Confirmar los indicios previos que hacen al emplazamiento sospechoso de estar contaminado.
- Acotar las zonas a investigar con el fin de dirigir más certeramente el diseño del muestreo.
- Acotar en lo posible la naturaleza de la contaminación.
- Realizar una primera aproximación a las repercusiones de la contaminación del suelo.

En numerosas investigaciones se pone de manifiesto que esta etapa no está suficientemente desarrollada. Sin embargo, cuando es posible reconstruir detalladamente el pasado del emplazamiento se facilitan notablemente las labores posteriores, reduciendo su coste económico y temporal, evitando imprevistos y mejorando en gran medida la calidad de las conclusiones finales obtenidas.

La estrategia a seguir en el estudio histórico dependerá en gran medida del tipo de emplazamiento a investigar (emplazamientos industriales en activo, ruinas industriales, vertederos activos o abandonados, emplazamientos con tanques subterráneos de almacenamiento, etc.). En general, los **aspectos sobre los que incidir** pueden resumirse en los siguientes:

- a) Antecedentes generales: ubicación geográfica, topografía previa a la implantación de la actividad, superficie (libre y edificada), uso(s) anterior(es) del emplazamiento y de zonas adyacentes, datos de constitución de la empresa, propietarios y usuarios, actividades productivas desarrolladas en el emplazamiento, cambios en los procesos productivos, permisos y licencias de vertido o relleno, estudios previos elaborados (geológicos, geotécnicos, etc.).
- b) Distribución cronológica del emplazamiento (superficial y subterránea): localización de edificios, instalaciones, redes de servicios, canalizaciones y tuberías, tanto actuales como antiguas, aéreas y subterráneas; localización de procesos productivos; materiales y estructuras de edificios e instalaciones (presencia de amianto, espesor de soleras, cimentación, etc.).
- c) Procesos productivos: análisis por períodos de actividad; características principales (composición química y cantidades) de materias primas y reactivos, productos fabricados y residuos generados; características de las emisiones gaseosas y líquidas; destino y gestión de los residuos procedentes de la actividad productiva; naturaleza de los combustibles utilizados y forma de almacenamiento.
- d) Identificación de zonas diferenciadas que han soportado actividades similares desde el punto de vista de una posible afección al suelo: secciones de las instalaciones productivas, talleres, zonas de almacenamiento (materias primas, productos y residuos), subestaciones eléctricas, escombreras de residuos, laboratorio, etc.
- e) Sucesos relevantes ocurridos: fugas, escapes, roturas, derrames de tuberías, depósitos, cubas, etc.; paradas forzadas; accidentes durante el periodo de actividad; inspecciones; pruebas periódicas (estanqueidad, etc.); denuncias; afecciones esporádicas, etc.

Aunque puede variar significativamente de unos tipos de emplazamientos a otros, las **fuentes**



de información más habituales para realizar el estudio histórico son las siguientes: inventarios de emplazamientos con actividades potencialmente contaminantes del suelo, Catastro, Registro de la Propiedad, Registro Mercantil, Registro Industrial, Cámaras de Comercio, archivos municipales, servicios cartográficos, hemerotecas, documentos propios de las empresas, entrevistas directas con propietarios, empleados y clientes, fotografías (aéreas o terrestres) y documentación administrativa.

Como resultado del análisis de la información obtenida se pretende obtener una interrelación entre las distintas zonas y procesos productivos identificados y la problemática de contaminación del suelo previsiblemente asociada a las mismas. Es recomendable elaborar, al menos, un cuadro resumen de procesos productivos, residuos y contaminantes asociados (por zonas) y un plano resumen de localización de zonas potencialmente contaminadas.

4.2 Estudio del medio físico

El **objetivo** principal del estudio del medio físico es recopilar información de naturaleza diversa que permita alcanzar un conocimiento suficiente del emplazamiento y sus alrededores para elaborar el modelo conceptual en lo relativo a las vías preferenciales de migración de los contaminantes y a las rutas de exposición de los potenciales receptores de la contaminación.

Aunque no es posible definir con carácter general la información a recopilar, se citan a continuación los **aspectos sobre los que normalmente incide** el estudio del medio físico:

- Características geológicas, hidrogeológicas y geotécnicas del emplazamiento y su entorno.
- Características edafológicas y geoquímicas del suelo.
- Hidrología de las aguas superficiales (en su caso).
- Topografía actual del emplazamiento.
- Características climáticas de la zona.
- Ecosistemas presentes en el emplazamiento y su entorno.
- Información demográfica, patrones de comportamiento de la población.
- Usos del suelo (reales y normativos) actuales y previstos, tanto en el emplazamiento como en su entorno.
- Calidad y usos actuales y previstos de las aguas (superficiales y subterráneas).

Para la recopilación de estos datos se suele acudir a varias **fuentes** (bases de datos, mapas temáticos, etc.), completándose en lo preciso durante las visitas de campo.

4.3 Inspección del emplazamiento



Entre los **objetivos** de la inspección del emplazamiento cabe citar la confirmación y/o matización de la información previamente recopilada, así como la obtención de datos adicionales sobre aspectos específicos que sólo la visita puede proporcionar.

La optimización de los resultados de la inspección de un emplazamiento aconseja diseñar antes en gabinete un programa para la misma, el cual debe contemplar básicamente los siguientes aspectos:

- Datos sobre los que centrar la búsqueda de información, de acuerdo con los objetivos del estudio y los resultados obtenidos en trabajos previos.
- Medios humanos y materiales precisos.
- Medidas de seguridad y equipos de protección personal que pueden ser necesarios durante el reconocimiento.
- Solicitud de permisos de acceso al emplazamiento.

Siempre que las condiciones lo permitan, la inspección debe efectuarse por un equipo multidisciplinar familiarizado con este tipo de trabajos y con las características del lugar. En lo posible la inspección se realizará a pie y, en todo caso, se dispondrá de documentación gráfica de soporte (planos, mapas, fotografías aéreas) a fin de localizar sobre ella los datos significativos. La realización de un reportaje fotográfico resulta siempre del máximo interés.

Los **aspectos en los que habitualmente se centra** la inspección de un emplazamiento son los siguientes:

- Alteraciones organolépticas del suelo, aguas y vegetación.
- Cambios en la situación de las instalaciones (límites, edificios, accesos, estructuras superficiales y subterráneas) respecto a la información histórica previamente obtenida.
- Indicios de presencia de rellenos artificiales, fenómenos de sedimentación, movimientos de tierras, etc.
- Localización y estado de las redes de servicios (abastecimiento, saneamiento y depuración de aguas, distribución de energía eléctrica, telefonía, gas, etc.).
- Identificación de posibles interferencias operacionales durante los posteriores trabajos de campo con las actividades desarrolladas en el emplazamiento.
- Accesibilidad al emplazamiento (infraestructuras de transporte existentes).
- Disponibilidad de espacio y servicios básicos para ubicar las instalaciones necesarias para llevar a cabo posteriores investigaciones.
- Requisitos legales y administrativos que puedan condicionar el diseño y ejecución de los trabajos posteriores de investigación.

Si bien el primer reconocimiento de un emplazamiento no suele ir encaminado a la toma de



muestras, se suele aprovechar la inspección del lugar para muestrear de forma limitada medios fácilmente accesibles, así como para medir ciertos parámetros in situ mediante equipos portátiles.

En cualquier caso, la inspección del emplazamiento debe aprovecharse para obtener información en fuentes de difícil acceso desde el gabinete (autoridades e instituciones locales, residentes de los alrededores, operarios, transportistas de residuos, etc.).

4.4 *Modelo conceptual del emplazamiento*

El análisis de la información obtenida en los trabajos previos debe dar lugar, en primer término, a una evaluación de la calidad y fiabilidad de la misma, identificando además las lagunas que sería deseable cubrir en trabajos posteriores.

En segundo lugar, debe elaborarse un **modelo conceptual inicial del emplazamiento**, en el que se formulan las primeras hipótesis acerca de la problemática del mismo, en términos de los elementos básicos que conforman cualquier análisis de riesgos:

- Causas y focos de contaminación a lo largo del tiempo, localizados en el emplazamiento de la forma más precisa posible. A cada uno de los focos deben asociarse los contaminantes significativos (contaminantes individuales o familias).
- Mecanismos más relevantes de migración de los contaminantes, es decir, procesos que afectan a aquéllos desde que son liberados en un foco hasta que alcanzan a un receptor. A efectos de valoración, suele distinguirse entre mecanismos de transporte (dentro de un mismo medio), transferencia (de un medio a otro) y transformación (conversión en otras especies químicas).
- Pautas de distribución espacial de los contaminantes en los distintos medios previsiblemente afectados (suelo, agua subterránea, agua superficial, etc.), que vienen determinadas por la ubicación de los focos, la naturaleza de los contaminantes implicados y los mecanismos de migración dominantes en las condiciones particulares del emplazamiento. Es deseable que dichas pautas permitan establecer una zonificación del emplazamiento sobre la que apoyar el posterior diseño de la toma de muestras.
- Receptores (humanos y ecológicos) que pueden estar razonablemente expuestos a los contaminantes, medios de contacto (suelo, agua, aire) y vías de exposición (ingestión, contacto dérmico, inhalación).

La calidad del modelo conceptual inicial es uno de los factores cruciales para optimizar los posteriores trabajos de Caracterización Analítica y, sobre todo, Detallada. Por ello, es esencial que participe en su elaboración un equipo multidisciplinar y experto en los distintos aspectos que conlleva.

A medida que se obtengan nuevos datos proporcionados por trabajos adicionales de investigación, las abundantes incertidumbres que suele incorporar el modelo conceptual inicial se irán despejando, permitiendo así un acercamiento progresivo al diagnóstico.



5 CARACTERIZACIÓN ANALÍTICA Y DETALLADA

5.1 Introducción

En la mayor parte de los estudios de emplazamientos contaminados el conocimiento que proporciona la Caracterización Inicial no es suficiente para elaborar un diagnóstico del problema. Es entonces cuando se hace necesario abordar una Caracterización Analítica y, en numerosos casos, una Caracterización Detallada. Ambas están apoyadas en la ejecución de trabajos de campo más o menos intensivos.

La primera tiene por objeto proceder a un primer muestreo (de alcance bastante limitado) y análisis químico sistemático de los medios que, de acuerdo con el modelo conceptual inicial del emplazamiento, puedan encontrarse afectados (suelo, aguas subterráneas, aguas superficiales, etc.). La segunda comprende la toma de muestras y análisis químicos exhaustivos que permitan delimitar espacial y temporalmente la contaminación y la obtención de otros datos necesarios para elaborar el análisis de riesgos (parámetros determinantes de la distribución de los contaminantes en los distintos medios y de la migración de aquéllos a través de los mismos, parámetros que caracterizan la exposición de los receptores potenciales, etc.).

Estas etapas de caracterización, sobre todo la Detallada, son las que habitualmente conllevan una mayor dedicación de recursos, por lo que la optimización de los mismos requiere una cuidadosa planificación de los trabajos.

El **diseño previo en gabinete** de cada campaña de trabajo de campo debe realizarse a la vista de los objetivos concretos que se pretenden alcanzar. En todo caso, se recomienda que, en lo posible, se planifique y documente en gabinete la ubicación de calicatas, perforaciones, sondeos, piezómetros a instalar, puntos de muestreo y tipos de muestras y, en general, cualquier trabajo que sea localizable en el espacio. Ello debe compaginarse con la necesaria flexibilidad y capacidad de improvisación que han de poseer los integrantes del equipo de campo a fin de poder afrontar situaciones imprevistas que en este tipo de trabajos aparecen con frecuencia.

La preparación de los trabajos en gabinete debe contemplar la definición de los medios humanos y materiales necesarios para abordar las investigaciones, incluyendo las medidas de seguridad y equipos de protección personal oportunos. Así mismo se deben adelantar las gestiones precisas para garantizar el acceso al emplazamiento de las personas y equipos involucrados en los trabajos. La documentación elaborada para preparar en gabinete los posteriores trabajos de campo se incorporará al informe de la investigación.

La experiencia demuestra que, sobre todo en la Caracterización Detallada, la ejecución de las **investigaciones de campo por etapas** sucesivas constituye una buena práctica de cara a obtener los mejores resultados al menor coste posible.

Siempre que otros condicionantes no lo impidan, se recomienda definir una primera campaña tendiente a obtener datos lo más detallados posible acerca de las características geológicas e hidrogeológicas del emplazamiento, así como una primera aproximación al estado de contaminación del mismo (tipología, extensión y medios afectados) mediante un muestreo y analítica en laboratorio relativamente reducidos. A la vista de los resultados de esta campaña, se



decidirán los objetivos y contenidos de una segunda, pudiendo repetirse este proceso tantas veces cuantas sea preciso.

En cualquier caso, la mayor parte de los trabajos de campo persigue **obtener datos acerca de** los siguientes aspectos:

- ♦ **Características geológicas e hidrogeológicas** del emplazamiento.
- ♦ **Naturaleza y extensión de la contaminación**, determinadas mediante toma de muestras y posterior análisis (in situ y en laboratorio).

En los siguientes epígrafes se exponen algunas consideraciones generales acerca del modo de acometer estos trabajos, citándose las principales técnicas disponibles, buena parte de las cuales han sido heredadas de otros campos y adaptadas a las especificidades de la investigación de emplazamientos contaminados. Una información más detallada sobre las características y posibilidades de aplicación de las técnicas mencionadas puede encontrarse en la abundante bibliografía disponible.

5.2 *Caracterización geológica e hidrogeológica*

La necesidad de **conocer en detalle los mecanismos que rigen la migración de los contaminantes** en un emplazamiento determinado requiere a menudo complementar la información disponible a priori con investigaciones in situ sobre las características geológicas e hidrogeológicas del mismo. Tales investigaciones pueden orientarse exclusivamente a este aspecto o aprovecharse también para otros fines (en particular, la toma de muestras para análisis químico), lo cual debe preverse de antemano en la medida que condiciona los métodos y técnicas de investigación aplicables.

A continuación se describen las **técnicas habitualmente utilizadas** para este tipo de caracterización.

5.2.1 **Métodos de prospección geofísica**

Los métodos de prospección geofísica agrupan un conjunto de técnicas no intrusivas que miden diferencias en propiedades físicas tales como la conductividad eléctrica, la densidad o la velocidad de las ondas sísmicas, por lo que pueden ser utilizados para detectar superficies límite en las que se produce un cambio claro en el valor de la propiedad física medida.

No siempre es posible detectar la superficie límite debido a que, a menudo, los valores de las propiedades físicas varían gradualmente y no de forma brusca. Por ello, los métodos geofísicos poseen un valor limitado en la investigación de emplazamientos contaminados, recomendándose en general su utilización como **técnicas complementarias de otras**. No obstante, en determinadas circunstancias pueden proporcionar información muy valiosa a un coste reducido en comparación con otras técnicas.

Los métodos geofísicos más aplicados son: reflexión/refracción sísmica, resistividad eléctrica, métodos electromagnéticos, radar y magnetometría. Son útiles para determinar la estratificación del subsuelo, la presencia de aguas subterráneas, acotar la ubicación de residuos enterrados, etc.



La tabla adjunta resume las principales posibilidades de aplicación de los métodos de prospección geofísica en los estudios de espacios contaminados.

Método	Aplicación	Ventajas	Inconvenientes
Reflexión y/o refracción sísmica Determina cambios en la litología del subsuelo	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluación de recursos hídricos subterráneos - Perfiles geotécnicos - Perfiles estratigráficos del subsuelo 	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil accesibilidad - Gran capacidad (profundidad) de penetración - Cubre áreas de forma rápida 	<ul style="list-style-type: none"> - Baja resolución en sustratos muy estratificados - Sensible al ruido en zonas urbanas - Dificultades de penetración en ambientes fríos - Aplicación limitada en ambientes húmedos
Resistividad eléctrica Determina cambios de resistividad debidos a la litología, presencia de agua subterránea y cambios de su calidad	<ul style="list-style-type: none"> - Profundidad del nivel freático - Perfiles estratigráficos del subsuelo - Evaluación de recursos hídricos subterráneos - Estudio de acuíferos - Estudio de vertederos 	<ul style="list-style-type: none"> - Cubre áreas de forma rápida - Gran capacidad de penetración (150-300 m) - Movilidad alta - Resultados aproximados en campo 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensible a interferencias eléctricas naturales y artificiales - Aplicación limitada en ambientes húmedos y zonas urbanas - Dificultad de reflejar la heterogeneidad lateral
Prospección electromagnética Determina cambios de conductividad debidos a la litología y calidad de las aguas subterráneas	<ul style="list-style-type: none"> - Perfiles estratigráficos del subsuelo - Evaluación de la contaminación de las aguas subterráneas - Estudio de vertederos - Evaluación de recursos hídricos subterráneos - Detección de instalaciones enterradas 	<ul style="list-style-type: none"> - Gran movilidad - Rápida resolución e interpretación de resultados - Fácil accesibilidad - Efectividad en el análisis de resistividades altas - Equipos fácilmente accesibles 	<ul style="list-style-type: none"> - Resultados menos refinados que la resistividad - Inadecuada en zonas con instalaciones eléctricas enterradas - Menor resolución vertical que otros métodos (hasta unos 30 m.) - Aplicación limitada en ambientes húmedos
Radar penetrante Proporciona perfiles "visuales" continuos de los niveles superiores del subsuelo	<ul style="list-style-type: none"> - Detección de objetos enterrados - Delineación de la estructura y situación de sustratos rocosos - Detección de formaciones cársticas - Evaluación de la integridad física de estructuras artificiales de tierra 	<ul style="list-style-type: none"> - Puede cubrir grandes áreas - Alta resolución vertical en terrenos adecuados (arenosos y no saturados) - Representación "visual" de resultados 	<ul style="list-style-type: none"> - Limitada profundidad de penetración (15-25 m) - Accesibilidad limitada por el tamaño de los equipos - Discutible interpretación de resultados en algunos casos - Aplicación limitada en ambientes húmedos

Método	Aplicación	Ventajas	Inconvenientes
Magnetometría Detecta la presencia de objetos metálicos féreos enterrados	- Localización de objetos féreos enterrados - Detección de los límites de vertederos que contengan objetos féreos - Localización de estratos rocosos con minerales féreos	- Gran movilidad - Posible interpretación de resultados en campo - Puede cubrir áreas de forma rápida	- La detección depende del tamaño y contenido en hierro del objeto enterrado - Difícil resolución en zonas urbanas - Aplicación limitada en ambientes húmedos - Difícil interpretación en zonas con corrientes magnéticas naturales - Profundidad de penetración limitada a unos 20 m.

5.2.2 Excavaciones

Las excavaciones realizadas con maquinaria específica (retroexcavadoras o similares) y con diferentes formas (calicatas, zanjas, trincheras) son técnicas intrusivas relativamente baratas, si bien presentan limitaciones en cuanto a la profundidad que pueden alcanzar. Su ejecución permite una identificación y descripción del perfil del subsuelo y suele aprovecharse para tomar muestras de residuos y suelos para su caracterización geotécnica y/o química.

5.2.3 Perforaciones y sondeos

Agrupan diversas técnicas que proporcionan información puntual, pudiendo alcanzarse con algunas de ellas grandes profundidades. En términos generales se pueden considerar como métodos caros, si bien son casi ineludibles.

Una **clasificación según el tipo de equipo** con que se ejecuta la perforación distingue las siguientes:

- **Sondeos manuales:** en ellos el accionamiento es puramente manual, sin presencia de equipos mecánicos, por lo que éstos resultan fáciles de transportar y manejar. Por contra, son los más sensibles a la dureza del suelo a perforar y raramente permiten profundizar más de 5 m, siendo lo más habitual hasta 3 m en terrenos favorables. La perforación se produce por rotación o percusión de varillas en cuyo extremo inferior se conectan diversos tipos de sondas, cada una de las cuales está diseñada para una clase de suelo en función de la granulometría, dureza y humedad de éste. Las sondas más habituales en investigación de espacios contaminados son: sonda de embudo, sonda Edelman (o cuchara holandesa), Riverside, cuchara de gravas, sonda de suelos arenosos, barrena helicoidal, sonda de pistón y sonda de media caña.
- **Sondeos ligeros** o semimecánicos: en ellos el accionamiento se produce por un martillo, alimentado por un motor eléctrico o neumático, que transmite al cabezal de perforación un efecto de rotación o de percusión, provocando el avance de la sonda. Estos equipos son más difíciles de transportar que los de los sondeos manuales. A cambio, el sondeo puede alcanzar profundidades mayores (típicamente, unos 10 m) y diámetros de hasta unos 10 cm. Las sondas ligeras más habituales en investigación



de espacios contaminados son: barrena helicoidal, sonda acanalada y sonda acanalada reforzada.

- **Sondeos mecánicos:** en ellos el accionamiento es totalmente mecánico, requiriendo equipos pesados y de manejo relativamente complejo que deben transportarse en camiones. Ello hace que puedan tener dificultades de acceso a determinados puntos. En cambio, son los sistemas que permiten alcanzar mayores profundidades de perforación (del orden de decenas de metros) y diámetros (hasta aproximadamente 1 m). Los equipos de perforación mecánica más habituales en investigación de espacios contaminados son: rotación con corona, rotación con barrena helicoidal y rotopercusión. Con menos frecuencia se utilizan equipos de percusión, rotación con circulación directa o rotación con aire.

El Anexo 1 contiene tablas que sintetizan las características básicas de los equipos de perforación y sondas citados. El Anexo 6 contiene imágenes de algunos de ellos.

La **clasificación** de los sistemas de perforación **según su principio de acción** permite distinguir básicamente: **sondeos a rotación**, **sondeos a percusión** y **sondeos a rotopercusión**. En los primeros se suele diferenciar entre: rotación con barrena helicoidal (maciza o hueca), rotación con circulación directa o inversa y rotación con batería (extracción de testigo). En el Anexo 1 también se incluye un esquema básico de los mismos.

La ejecución de sondeos se aprovecha normalmente para la toma de muestras (alteradas o inalteradas) de los materiales atravesados para su posterior caracterización en laboratorio. Así mismo estas técnicas son necesarias para la instalación de piezómetros y pozos de monitorización de las aguas subterráneas. Esta cuestión es importante a la hora de seleccionar el tipo de equipo de perforación más adecuado para un determinado sondeo.

5.2.4 Piezómetros y pozos de control de las aguas subterráneas

Los piezómetros sirven exclusivamente para medir el nivel piezométrico de las formaciones acuíferas en puntos seleccionados, mientras que los pozos de control permiten además la toma de muestras representativas de las aguas subterráneas del emplazamiento. En uno y otro caso las lecturas de niveles efectuadas durante un periodo suficientemente dilatado constituyen valiosa información para conocer las pautas de los flujos de las aguas subterráneas del emplazamiento.

El **diseño** de los pozos de control debe ser acorde con las características hidráulicas de los materiales que constituyen el perfil del terreno y con los objetivos específicos de los propios pozos. En cualquier caso, el relleno de la perforación intentará “reproducir” el perfil del terreno natural, sustituyéndolo por materiales de composición granulométrica, físico-química y comportamiento hidráulico similar a aquél. El Anexo 2 contiene algunos ejemplos de los tipos de pozos de control más frecuentes en investigación de espacios contaminados: pozos simples, pozos anidados y pozos con muestreo a varias profundidades.

La **instalación** de cualquier pozo de control debe efectuarse siguiendo un conjunto de normas de buena práctica que se refieren tanto a los métodos y equipos de perforación como a los materiales constitutivos de los distintos elementos del pozo. Todo ello va encaminado a evitar indeseables interferencias en la calidad de las aguas y, consecuentemente, a garantizar



la representatividad de las muestras que posteriormente se tomen.

La tabla adjunta resume las principales ventajas e inconvenientes de los sistemas básicos de perforación de cara a la instalación de pozos de control.

Sistema	Ventajas	Inconvenientes
Helicoidal	<ul style="list-style-type: none"> Minimización de daños al acuífero. No requiere fluidos de perforación. El varillaje actúa como entubación temporal evitando el derrumbamiento de las paredes. Adecuado para materiales no consolidados. Pueden obtenerse muestras de suelo. 	<ul style="list-style-type: none"> No es adecuado para roca consolidada. Profundidad limitada hasta unos 30 m. Abandono del sondeo en caso de que aparezcan cantos gruesos.
Rotación	<ul style="list-style-type: none"> Método rápido y eficaz. Adaptado a sondeos de pequeño y gran diámetro. Permite alcanzar profundidades importantes. Puede utilizarse tanto en medios consolidados como no consolidados. Se puede obtener testigo continuo (perforación con corona) o ripios (perforación con tricono). 	<ul style="list-style-type: none"> En ocasiones requiere fluidos de perforación que pueden alterar el nivel y la química de las aguas subterráneas. Puede provocar una impermeabilización parcial de las paredes del sondeo lo que obliga a un desarrollo posterior exhaustivo.
Percusión	<ul style="list-style-type: none"> En pocas ocasiones requiere el uso de fluidos de perforación. Puede utilizarse tanto en medios consolidados como no consolidados. Permite un control litológico regular. Adecuado para sondeos en gravas. 	<ul style="list-style-type: none"> Ejecución muy lenta. No permite obtener testigo de la perforación.

Las principales **normas de buena práctica** a respetar en la perforación e instalación de pozos de control se pueden resumir en las siguientes:

- El equipo y método de perforación debe minimizar la alteración de los niveles acuíferos, evitando el posible traslado de contaminación de unos niveles a otros. En este sentido, es recomendable evitar el uso de fluidos de perforación (si son imprescindibles, usar agua limpia) y utilizar tuberías de entubación temporal de las paredes del sondeo.
- Los equipos de perforación (en particular, los elementos en contacto con el suelo) deben limpiarse con frecuencia y, como mínimo, entre dos sondeos consecutivos. Además deben utilizarse materiales auxiliares que no introduzcan contaminación en la perforación (por ejemplo, polvo de grafito en lugar de aceites minerales lubricantes).
- Para la instalación del pozo propiamente dicho deben elegirse materiales que no interfieran significativamente con la composición química del agua subterránea. A



este respecto, tan importante es la tubería piezométrica como los materiales de relleno del espacio anular (gravilla silícea, bentonita y lechada de cemento o cemento-bentonita).

La siguiente tabla resume las ventajas e inconvenientes de los materiales constitutivos de las tuberías piezométricas más habituales en la instalación de pozos de control.

Material	Ventajas	Inconvenientes
Politetrafluoroetileno (PTFE) o Teflón®	<ul style="list-style-type: none"> Ligero Resistente a la mayor parte de los compuestos químicos 	<ul style="list-style-type: none"> El más frágil de todos los materiales plásticos.
Cloruro de polivinilo (PVC)	<ul style="list-style-type: none"> Ligero. Resistente a álcalis débiles, alcoholes, hidrocarburos alifáticos y aceites. Resistencia moderada a ácidos y bases fuertes. 	<ul style="list-style-type: none"> Más frágil que el acero, el hierro y el polietileno. Menor resistencia química que el PTFE.
Polietileno (PE)	<ul style="list-style-type: none"> Ligero. Alta resistencia al impacto y a la abrasión. Buena resistencia química. 	<ul style="list-style-type: none"> Se deteriora en presencia de cetonas, ésteres e hidrocarburos aromáticos Menor resistencia química que el PTFE pero más que el PVC.
Polipropileno (PP)	<ul style="list-style-type: none"> Ligero. Resistente a ácidos concentrados hasta 50°C. Moderadamente resistente a álcalis, alcoholes, cetonas y ésteres. Buena rigidez y resistencia al choque y a la abrasión. 	<ul style="list-style-type: none"> Se deteriora en contacto con ácidos oxidantes, hidrocarburos alifáticos e hidrocarburos aromáticos. Menor resistencia química que el PTFE pero más que el PVC.
Acero inoxidable	<ul style="list-style-type: none"> Alta resistencia mecánica. Buena resistencia química. 	<ul style="list-style-type: none"> Puede constituir una fuente de cromo en medios con pH bajo. Puede catalizar ciertas reacciones orgánicas
Acero galvanizado	<ul style="list-style-type: none"> Alta resistencia mecánica. 	<ul style="list-style-type: none"> Puede constituir una fuente de zinc. En caso de daños en la superficie puede corroerse, provocando superficies de gran sorción para metales.

Además de lo anterior, para dar por finalizada la instalación de un pozo de control y poder garantizar la representatividad de las futuras muestras de agua subterránea que se tomen del mismo es preciso proceder a su desarrollo. Esta operación persigue eliminar las perturbaciones provocadas por la perforación e instalación en las inmediaciones del acuífero. Suele consistir en el bombeo de agua del interior del pozo hasta extraer las partículas finas que pudieran obturar los tramos ranurados de tubería y comprobar que la conductividad del agua se estabiliza.

5.2.5 Ensayos para determinar parámetros hidrodinámicos



Son técnicas habitualmente utilizadas en la evaluación de los recursos hídricos subterráneos. Aportan información complementaria a la suministrada por los niveles piezométricos y permiten estimar los parámetros hidrodinámicos básicos de las formaciones acuíferas del emplazamiento (permeabilidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, etc.).

La investigación hidrogeológica ha puesto a punto diversos ensayos de campo que permiten la obtención de datos a partir de los cuales pueden derivarse los citados parámetros. Entre ellos, los más frecuentemente utilizados son los de permeabilidad y los de bombeo.

5.2.5.1 Ensayos de permeabilidad

La permeabilidad o conductividad hidráulica refleja la facilidad con la cual un material deja pasar el agua a su través. Los ensayos de permeabilidad realizados durante la perforación de sondeos representan las condiciones del acuífero en las inmediaciones de la perforación. No obstante, pueden verse afectados por múltiples factores (sistema de perforación empleado, utilización de lodos de perforación, tipo de acuífero, etc.), por lo que su interpretación debe tenerlos en cuenta.

Los ensayos de permeabilidad más utilizados son los denominados **Lugeon** (apto para sustratos rocosos consolidados), **Gilg-Gavard** (adecuado para terrenos de permeabilidad media o baja), **Lefranc** (utilizado preferentemente en terrenos no consolidados) y “**slug-test**” (para formaciones de baja permeabilidad).

5.2.5.2 Ensayos de bombeo

Los ensayos de bombeo se suelen realizar de forma escalonada, procediendo a bombear agua en un pozo de referencia y observando la evolución de los niveles piezométricos en los demás pozos o puntos de observación disponibles. Durante los ensayos se registran datos relativos a caudales de agua bombeados, tiempos de bombeo, niveles piezométricos, etc.

Una vez finalizado el bombeo, se suele registrar la evolución de los niveles estáticos a lo largo del tiempo de recuperación. Estos datos son posteriormente evaluados mediante diferentes modelos, aplicables según el tipo de formación acuífera que se trate.

5.3 Toma de muestras para evaluación de la contaminación

La evaluación de la contaminación presente en los distintos medios del emplazamiento se realiza a través de la toma de muestras de dichos medios y su posterior análisis, bien in situ, bien en laboratorio. En este epígrafe se desarrollan las principales consideraciones a tener en cuenta a la hora de diseñar y ejecutar el muestreo y se presentan los equipos más frecuentemente utilizados en las investigaciones de espacios contaminados.

5.3.1 Diseño de la estrategia de muestreo

El muestreo de los medios potencialmente afectados para su posterior análisis constituye la **principal herramienta para cuantificar la naturaleza y extensión de la contaminación**. Siendo éste un aspecto clave del diagnóstico, y teniendo en cuenta el elevado coste de los análisis, el muestreo debe abordarse siguiendo una estrategia definida de antemano.



La **estrategia de muestreo** siempre debe ir encaminada a optimizar la relación entre la cantidad de información conseguida y el coste de su obtención, para lo cual es frecuente dividir estos trabajos en etapas, de forma que se vaya acotando progresivamente tanto el carácter como el ámbito espacial afectado por la contaminación. Una recomendación adicional (en particular, para muestras de matrices sólidas) es que sistemáticamente se proceda a tomar un mayor número de muestras de las que a priori se van a analizar en el laboratorio, con lo cual se gana en flexibilidad y se ahorran costes de repetición de muestreos.

A continuación se sintetizan las recomendaciones genéricas relativas a los aspectos a contemplar en el diseño de la estrategia de muestreo.

5.3.1.1 Medios a muestrear

El **alcance del muestreo** puede variar ampliamente no sólo de un emplazamiento a otro sino también en función de los objetivos específicos de la fase de investigación.

En general, el muestreo se puede extender a **matrices sólidas** (suelos, sedimentos, productos y residuos), **líquidas** (aguas superficiales y subterráneas, lixiviados, productos y residuos), **gases** (aire ambiente, aire intersticial del suelo) y **elementos bióticos** (fitoplancton, plantas acuáticas microscópicas, macrofitas y animales). De todos estos medios, los que son objeto de muestreo con mayor frecuencia son: suelos, residuos, aguas (sobre todo subterráneas) y aire intersticial del suelo.

5.3.1.2 Localización, número de puntos y profundidad del muestreo

Dependen básicamente de los medios a muestrear y de los objetivos y fase de investigación que se trate.

Para el diseño del **muestreo de suelos** se han desarrollado algunas orientaciones que pretenden sistematizar y facilitar esta tarea. En primer lugar, cabe distinguir dos tipos de esquemas de localización de puntos de muestreo:

- **Muestreo simple:** aplicable cuando, por el emplazamiento y la fase de investigación que se trate, no existen razones naturales, históricas o de otro tipo para diferenciar áreas dentro del mismo.
- **Muestreo estratificado:** se aplica habitualmente cuando la información previa existente aconseja diferenciar por algún motivo áreas dentro del emplazamiento.

Para ayudar a decidir la localización concreta de los puntos de muestreo dentro del emplazamiento se acude a **modelos de distribución** más o menos conceptuales (ver Anexo 3). La conveniencia de aplicar uno u otro depende básicamente de las características del emplazamiento en estudio y de los objetivos concretos de la etapa de investigación, debiéndose utilizar distintos esquemas a medida que se va acotando y cuantificando la problemática. La tabla adjunta resume los modelos más habituales y sus respectivas aplicaciones.

Objetivos	Modelo de distribución de puntos de muestreo
-----------	--

	Criterio experto	Aleatorio	Sistemático	Sistemático tresbolillo	Estratificado	Transecto
Confirmar hipótesis de contaminación	1	4	2a	3	3	2
Identificar fuentes	1	4	2a	1	2	3
Delimitar la extensión de la contaminación	4 ó 1	3	1b	1	3	1
Evaluar actuaciones y tratamientos	3	3	2	1	1	2
Confirmar la limpieza	4	1c	1	1	3	1

1. Método de elección preferente
2. Método aceptable
3. Método válido, pero no tan aceptable
4. Método no aceptable o no válido

- a. Debe utilizarse con métodos analíticos generales de campo, que permiten obtener rápidamente gran número de datos.
- b. Sólo utilizable cuando se conocen las tendencias.
- c. Para confirmación estadística en todo el área.

En cuanto a la profundidad del muestreo de suelos, la toma de muestras en un mismo punto de muestreo a diferentes profundidades debe decidirse a la vista de los objetivos particulares de la fase de investigación y teniendo en cuenta la movilidad de los contaminantes implicados. En general, el muestreo a varias profundidades en un mismo punto es habitual durante la Investigación Detallada.

La finalidad del **muestreo de residuos** es obtener información básica acerca de las características de los mismos (en el caso de las ruinas industriales), con vistas a decidir la forma de retirada y gestión más adecuada, o con vistas a acotar el tipo de afección previsible del suelo y/o las aguas subterráneas, en el caso de los vertederos. Como norma general, se recomienda evitar la toma de muestras compuestas y limitar el muestreo a aquellos residuos presentes en cantidades significativas y de los que no se posea información acerca de su composición y características. En cualquier caso, el alcance del muestreo de estos elementos durante la Investigación Preliminar suele ser limitado.

Para el diseño del **muestreo de aguas subterráneas**, es requisito previo conocer las pautas básicas del funcionamiento hidrogeológico del emplazamiento y su entorno próximo, en particular los niveles estratigráficos con significativa capacidad de almacenamiento y transmisión de agua y las respectivas direcciones del flujo de ésta en el subsuelo.

A partir de esta información, en la Caracterización Analítica se preverá la toma de un reducido número de muestras (procedentes, en especial, de la zona saturada), cuya localización permita confirmar o descartar la presencia de contaminación. Para ello, serán necesarias, como mínimo, dos muestras (una aguas arriba y otra aguas abajo del emplazamiento) situadas en las proximidades del foco contaminante. En caso de existir varios acuíferos potencialmente afectados, se debe dar prioridad a aquél que, desde el punto de vista hidrogeológico, sea más vulnerable a la contaminación procedente del foco (normalmente, el más superficial). En todo caso, se recomienda considerar sistemáticamente la posibilidad de tomar muestras en pozos o puntos de agua preexistentes en las proximidades del emplazamiento,



siempre y cuando posean características constructivas que garanticen la representatividad de los resultados analíticos posteriores.

En la Investigación Detallada se debe acotar la pluma de agua subterránea contaminada. Para la correcta determinación de los límites de la misma es necesario instalar pozos de control tanto dentro como en las proximidades de la pluma, es decir, aguas arriba, aguas abajo y lateralmente al foco contaminante, con el fin de obtener datos de referencia y caracterizar mejor la afección producida.

Un diseño de muestreo adecuado en principio para la mayoría de los casos (con excepción de medios kársticos), contemplaría una red de pozos dispuestos en cruz, con centro en el foco contaminante, con al menos un pozo aguas arriba (como referencia) y varios aguas abajo. El número de estos últimos y su distancia al foco dependerá de la permeabilidad del medio, de manera que cuanto más permeable sea éste, mayores distancias desde el foco en el sentido del flujo habrá que controlar. Al mismo tiempo, esta red de pozos debe permitir muestreos adecuados a las profundidades que interese, en función de la forma del penacho contaminante.

El **muestreo del aire intersticial del suelo** suele plantearse en aquellos emplazamientos donde se sospecha que, debido a la presencia de contaminantes volátiles o semivolátiles (gasolinas, disolventes, etc.), existen concentraciones significativas en la fase gaseosa del suelo, pudiendo darse además la migración de dichos contaminantes hacia zonas sensibles del entorno. Además, constituye una técnica de diagnóstico indirecto y orientativo de la extensión de la contaminación en el suelo y/o en las aguas subterráneas.

En la mayor parte de los casos, este tipo de muestreo se utiliza en la Investigación Preliminar con el objetivo de obtener una primera aproximación a la extensión de la contaminación del suelo propiamente dicho, que permita optimizar el posterior muestreo del mismo (un caso típico es la investigación de emplazamientos contaminados por hidrocarburos derivados del petróleo). En los vertederos con significativa presencia de residuos orgánicos biodegradables, el muestreo del aire intersticial (y la cuantificación del contenido en metano) constituye una herramienta útil, tanto para identificar zonas con distintos grados de actividad como para evaluar las posibilidades de migración del biogás al entorno próximo.

La estrategia de muestreo más habitual se traduce en una malla regular en planta, en cuyos vértices se sitúan los puntos de muestreo. Las dimensiones de la malla pueden variar mucho en función de las del propio emplazamiento, tipo de suelo y contaminantes implicados. A título meramente orientativo, mallas de entre 25 y 50 metros de lado pueden ser útiles en vertederos de mediana y gran entidad. En emplazamientos de pequeñas dimensiones (por ejemplo, estaciones de servicio) el tamaño de la malla debe reducirse considerablemente. En la componente vertical, el muestreo del aire intersticial suele realizarse a escasa profundidad, aunque depende del tipo de emplazamiento, situación de los focos de contaminación, profundidad del nivel freático, etc. A este respecto son habituales profundidades en torno a 1 metro y no suele muestrearse a más de 5 metros.

5.3.2 Preparación de los trabajos de muestreo

Por su trascendencia, la toma de muestras requiere una preparación específica previa a su



ejecución. Entre los preparativos a realizar en gabinete cabe destacar los siguientes:

- Representación de la **ubicación de los puntos de muestreo** en un plano a escala adecuada, en el que además se indique la localización de las redes de servicios identificadas y la de zonas que presenten algún riesgo específico (almacenamiento de productos peligrosos, instalaciones subterráneas, etc.).
- Preparación de **fichas de registro** para la recogida de datos relativos al muestreo (descripción de testigos de sondeos, identificación y descripción de muestras de distintas matrices, etc.).
- Elaboración de **etiquetas** para los recipientes que contendrán las muestras. Estas etiquetas deberán recoger, al menos, los siguientes datos: código del proyecto, fase y campaña de investigación, código de la muestra, naturaleza (medio) muestreado, localización (horizontal y vertical) de la muestra, fecha y hora de toma de la muestra y (en su caso) requisitos especiales para la manipulación, conservación y análisis de la muestra.
- Preparación de los **recipientes** que contendrán las muestras. Los recipientes deben limpiarse de forma acorde con los parámetros a analizar (ver normas generales de aclarado en Anexo 5). Además se prepararán los **materiales y reactivos requeridos para la conservación de las muestras en campo** (ver Anexo 5).

La **obtención de muestras representativas del estado real de contaminación del emplazamiento** es un requisito fundamental de cualquier investigación. La representatividad de las muestras se garantizará mediante la adecuación de los equipos de muestreo al medio y tipo de contaminante a estudiar, así como mediante el correcto uso de los mismos, siguiendo procedimientos estandarizados y reconocidos. En todo caso, es crucial aplicar sistemáticamente algunas **reglas de buena práctica**, entre las que cabe citar las siguientes:

- Utilizar equipos de perforación y muestreo constituidos por materiales que no puedan interferir significativamente con los tipos de contaminantes a analizar.
- Si el presupuesto de la investigación lo permite, utilizar material desechable (de un solo uso) o, al menos, proceder a la limpieza de los equipos de muestreo con agua "libre de toda sospecha de contaminación" entre la toma de dos muestras consecutivas.
- Organizar y ejecutar el muestreo de cada medio desde la zona supuestamente menos contaminada a la más contaminada, a fin de minimizar los riesgos de aparición de contaminación cruzada.

5.3.3 Sistemas y equipos de muestreo

A continuación se presentan los sistemas y equipos de muestreo más habituales para los medios que con mayor frecuencia son objeto de toma de muestras en las investigaciones de espacios contaminados. El Anexo 6 contiene fotos de algunos de los equipos citados.

5.3.3.1 Suelos

La toma de muestras de suelos suele ir asociada a la ejecución de excavaciones, perforaciones y sondeos que, a su vez, pueden tener sólo esta finalidad u otras añadidas. En consecuencia, los equipos y sistemas de muestreo deben preverse a la vista del conjunto de condicionantes. Los equipos más habituales de toma de muestras de suelos son, por una parte, los citados al describir los sondeos manuales y ligeros (cuchara Edelman, barrena Riverside, tomamuestras de pistón, etc.). A ellos hay que añadir los dispositivos tomamuestras acoplados a las baterías de perforación en sondeos mecánicos: sacatestigos de pared sencilla o de pared doble, tomamuestras de pared gruesa o de pared delgada (tubo Shelby), barrenas helicoidales huecas, tomamuestras cilíndricos, etc. El Anexo 4 contiene algunas indicaciones sobre el campo de aplicación de algunos equipos de muestreo de suelos.

5.3.3.2 Sedimentos

La toma de muestras de sedimentos en lagunas, lagos, ríos, etc. se lleva a cabo habitualmente con dos tipos de equipos:

- **Sondas manuales:** más apropiadas para muestrear sedimentos situados bajo una lámina de agua de poca profundidad. Permiten tomar la muestra a una determinada profundidad de la masa de sedimentos. Las sondas más frecuentes son las denominadas Beeker y de caída libre.
- **Dragas:** más apropiadas para muestrear sedimentos situados bajo una lámina de agua de considerable profundidad (por ejemplo, embalses o grandes lagos). La muestra corresponde al nivel más superficial de la masa de sedimentos. Entre las dragas más frecuentes se encuentran las denominadas Ekman, Ponar y Van Veen.

5.3.3.3 Aguas subterráneas

En el muestreo de aguas subterráneas cabe diferenciar el agua de la zona no saturada y el agua de la zona saturada.

El muestreo de **agua de la zona no saturada** es poco frecuente en investigaciones de espacios contaminados. Puede tener interés para modelizar la migración de la contaminación originada en focos superficiales y seguir su evolución en esta zona antes de que alcance el nivel freático. Los equipos de muestreo más habituales son lisímetros, filtros de membrana, cajas o varillas porosas y tomamuestras de succión.

La toma de muestras de **agua subterránea de la zona saturada** se suele llevar a cabo en pozos de control previamente instalados y desarrollados. Los sistemas y equipos de muestreo se pueden dividir en dos grandes grupos:

- **Sistemas manuales de depósito:** consisten en dispositivos de forma tubular que se introducen en el interior de la tubería piezométrica del pozo y que, por presión hidrostática o accionamiento de mecanismos de apertura y cierre, permiten la entrada de agua en su interior que posteriormente es elevada a superficie. El equipo más habitual en la actualidad es el tomamuestras de válvula o bola (bailer en inglés), en sus distintas configuraciones y materiales.

- **Sistemas de bombeo:** son los que presentan mayor diversidad de equipos y aplicaciones. Entre los tipos de bombas más comúnmente utilizadas en investigaciones de espacios contaminados cabe citar las de válvula de pie, las de pistón o cebado manual, las sumergibles (eléctricas o neumáticas) y las peristálticas.

La selección del equipo de muestreo más adecuado se debe realizar en función de varios criterios: profundidad del nivel freático, capacidad de bombeo y caudal suministrado por el acuífero, dimensiones de la tubería piezométrica, presencia/ausencia de compuestos volátiles, etc. El Anexo 4 contiene algunas indicaciones sobre las ventajas e inconvenientes de los equipos de muestreo de aguas subterráneas más habituales.

En todo caso, es importante tener presente que la obtención de una muestra representativa de aguas subterráneas de un pozo de control exige limpiar previamente el mismo mediante la extracción de determinados volúmenes de agua y con ciertos periodos de recuperación, comprobando que se estabilizan los valores de pH y conductividad eléctrica del agua extraída antes de obtener la muestra propiamente dicha. Esta medida es particularmente necesaria cuando se ha utilizado agua durante la perforación del sondeo ejecutado para instalar el pozo.

5.3.3.4 Aguas superficiales y residuos líquidos

En cuanto al muestreo de aguas superficiales y residuos líquidos, los equipos más habituales son las botellas tomamuestras y los muestreadores de tubo (Kemmerer, Van Dorn, bomba Bacon, Coliwas, bailer, tomamuestras de sobrenadantes).

5.3.3.5 Aire intersticial del suelo

Básicamente, existen dos tipos de técnicas de muestreo del aire intersticial del suelo:

- El **muestreo activo:** se basa en la captación del gas del suelo a la profundidad deseada mediante bombeo y trasvase a un medio receptor adecuado (jeringas o botellas de vidrio, tubos Tenax, bolsas Tedlar, etc.). Para ello se realiza un sondeo manual o ligero y se suelen usar sondas especialmente adaptadas a esta finalidad (por ejemplo, la sonda Stitz).
- El **muestreo pasivo:** en él, los gases del suelo se captan en un medio absorbente (por ejemplo, carbón activo) contenido en una cápsula que se entierra a escasa profundidad y se recupera tras un determinado tiempo de exposición (de días a semanas).

5.4 Preparación, conservación y transporte de muestras

Otras precauciones adicionales a contemplar en todo muestreo son las referentes a la preparación y conservación de muestras en campo y su posterior transporte al laboratorio. A este respecto, las principales **normas a seguir** son las siguientes:

- **Pretratamiento in situ** de las muestras: en particular para las muestras de agua es preciso proceder a determinadas operaciones durante su toma (filtrado, adición de reactivos, etc.) que varían en función de los parámetros a analizar posteriormente en laboratorio.



- **Envasado** (clases de botellas y frascos, materiales, cierres), **rotulación e identificación** de las muestras.
- **Conservación** de las muestras hasta su llegada al laboratorio: es requisito general proceder a la refrigeración de las muestras de modo que se garantice que su temperatura no supera los 4 °C antes de su entrada en el laboratorio de destino.
- **Empaquetado y transporte** de las muestras al laboratorio: la forma de embalar las muestras debe asegurar la completa inmovilidad de los recipientes que las contienen durante el transporte, el cual debe efectuarse dentro de los plazos recomendados, que habitualmente son inferiores a 24 horas desde que la muestra ha sido tomada.
- **Preparación de blancos:** siempre que sea posible, se recomienda incluir en cada lote de muestras algunas adicionales que sirvan como “blancos de campo”, es decir, muestras supuestamente no afectadas por el problema en estudio.
- **Cadena de custodia:** es el proceso que garantiza el control y seguimiento de las muestras desde su toma hasta que el laboratorio procede a su aceptación. Debe estar documentada mediante hojas de muestreo, albaranes de transporte y firmas de aceptación del laboratorio.

El Anexo 5 contiene un resumen de las principales recomendaciones a seguir respecto a los materiales de envasado y medidas de conservación en campo de muestras de suelos y aguas.

5.5 *Análisis in situ*

Cada vez es más frecuente utilizar en campo **técnicas de selección de muestras** apoyadas en la medición aproximada de contaminantes individuales o familias de los mismos **mediante equipos portátiles**. Estas técnicas, complementarias de los análisis en laboratorio suelen utilizarse para decidir sobre el terreno qué muestras tienen mayor interés en ser enviadas a aquél.

La tabla adjunta resume el campo de aplicación y las características básicas de los equipos utilizados más frecuentemente.

Técnica/Equipo	Campo de aplicación	Características básicas
Espectroscopía de fluorescencia por rayos X (XRF)	Determinación cuantitativa de metales	<ul style="list-style-type: none"> - Tiempo de respuesta corto. Alto rendimiento (200-400 muestras/día) - No aplicable a Hg y Be - Posibles interferencias con la matriz - Detección a nivel de ppm. Recomendable calibración in situ
Detector de ionización por llama (FID)	Determinación semi-cuantitativa de COVs	<ul style="list-style-type: none"> - Resultados inmediatos - Detección a nivel de ppm (depende de los compuestos) - Posibilidad de complementarlo con cromatografía de gases para identificar compuestos específicos

Técnica/Equipo	Campo de aplicación	Características básicas
Detector de fotoionización (PID)	Determinación semi-cuantitativa de contenido total de COVs	<ul style="list-style-type: none"> - Resultados inmediatos - No detecta compuestos individuales - Posibles interferencias ligadas a la humedad ambiente y a fuentes eléctricas - No considera el metano - Detección a nivel de ppm
Tests de inmunoensayo	Determinación cuantitativa de COVs, PAHs, hidrocarburos derivados del petróleo, PCBs, pesticidas, Hg	<ul style="list-style-type: none"> - Resultados rápidos. Alto rendimiento (30 ensayos/h) - Posibles interferencias - Pueden producir falsos positivos - Necesaria validación previa
Tests colorimétricos	Determinación semi-cuantitativa de un amplio espectro de compuestos orgánicos e inorgánicos	<ul style="list-style-type: none"> - Resultados rápidos - Posibles interferencias - Niveles de detección altos para algunos compuestos

Otro tipo de análisis o mediciones realizadas in situ con equipos portátiles son las orientadas a medir propiedades que pueden cambiar rápidamente (por ejemplo, pH, conductividad u oxígeno disuelto en muestras de agua).

Finalmente, en algunos emplazamientos es interesante realizar mediciones in situ de gases y vapores, a fin de detectar situaciones peligrosas o presencia de ciertos compuestos indicadores que pueden ayudar a decidir los puntos de muestreo de suelos o residuos. En este grupo se sitúan los explosímetros, los detectores de gas de vertedero o los tubos colorimétricos.

5.6 Estrategia analítica

El diseño del programa de análisis químico de las muestras tomadas en una determinada campaña o fase de investigación viene condicionado, en primera instancia, por los objetivos generales y específicos de la fase de investigación que se trate. En cualquier caso, este diseño debe definir dos aspectos básicos: los **parámetros** a determinar y los **métodos y técnicas analíticas** a utilizar.

En lo relativo a los parámetros, en términos generales suele ser interesante combinar determinaciones aproximadas en campo efectuadas mediante equipos portátiles con determinaciones de laboratorio que, por su parte, pueden referirse a parámetros totalizadores (por ejemplo, EOX, AOX, TPH, aceites minerales, índice de fenoles, etc.) o a parámetros cuantificadores de compuestos específicos. En lo que se refiere a los métodos analíticos, se ha de cuidar la adopción de métodos normalizados y reconocidos como válidos por normativas de prestigio internacional.

La estrategia analítica también está condicionada por factores técnicos y económicos. Para su optimización resulta clave la toma conjunta de decisiones entre el equipo de campo y el laboratorio. Teniendo en cuenta los elevados costes que suelen conllevar los análisis de laboratorio, en muchos casos resulta interesante adoptar el "screening" como estrategia de ejecución de análisis, comenzando con una analítica amplia sobre un reducido número de muestras significativas para, a la vista de los resultados, intentar acotar progresivamente las determi-



naciones a efectuar en las siguientes tandas de muestras. El “screening” presenta particular interés en las primeras etapas de muestreo, cuando la información acerca de los contaminantes implicados es más incierta.

6 MEDIDAS DE SEGURIDAD

Antes de realizar cualquier trabajo en un emplazamiento contaminado deben considerarse los aspectos relacionados con el riesgo para la salud y la seguridad de las personas que van a desarrollarlo, así como de las personas del entorno que, en su caso, pudieran verse afectadas. La adopción de medidas de seguridad y equipos de protección es un elemento ineludible de las investigaciones de campo. Para determinar unas y otros, se deben evaluar los riesgos inherentes a los trabajos que se prevé desarrollar.

El **Plan de Seguridad** es el instrumento documentado que recoge todas las consideraciones al respecto. Su contenido genérico es el siguiente:

- Antecedentes del emplazamiento relevantes para la seguridad
- Descripción del programa de trabajos a realizar
- Evaluación de riesgos
- Organización del personal en el trabajo
- Organización espacial del trabajo
- Medidas de seguridad colectiva
- Equipos de protección individual
- Formación y entrenamiento específico del personal
- Procedimientos generales y específicos de trabajo
- Instrucciones específicas para el manejo de materiales y equipos
- Procedimientos de descontaminación
- Control y seguimiento de condiciones ambientales
- Plan de actuación en situaciones de emergencia
- Programa de revisiones médicas

En general, los riesgos a los que se puede ver expuesto el personal del equipo de trabajo se derivan de los siguientes tipos de exposición:

- Exposición por contacto con contaminantes a través de la piel o de las mucosas.
- Exposición por ingestión accidental de medios contaminados (suelos, aguas, alimentos, etc.).
- Exposición por inhalación de gases o vapores.
- Exposición a peligros físicos derivados de las actividades desarrolladas y/o de la maquinaria y equipos implicados.
- Exposición a riesgos eléctricos, fuego o explosiones.

En la siguiente tabla se citan algunos de los equipos de protección, instrumentos de medida y procedimientos de seguridad comúnmente utilizados en la investigación de emplazamientos



contaminados.

Equipos de protección individual (EPI)	Instrumentos de medida	Procedimientos de seguridad
<ul style="list-style-type: none"> - Casco - Botas de seguridad - Guantes (en función de los contaminantes presentes) - Protectores auditivos - Gafas de seguridad - Máscaras y filtros (en función de los contaminantes presentes) - Botiquín de primeros auxilios - Extintor 	<ul style="list-style-type: none"> - Explosímetro - Detectores automáticos de gases - Tubos colorimétricos - Detectores de canalizaciones y tuberías enterradas 	<ul style="list-style-type: none"> - Formación y adiestramiento - Permisos de trabajo - Notificación a servicios de emergencia - Teléfonos de contacto - Instalaciones de descontaminación de equipos y personal - Procedimientos seguros de trabajo

7 EVALUACIÓN Y DOCUMENTACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos a lo largo de todos los trabajos de investigación constituyen la base para realizar el diagnóstico de la problemática del emplazamiento en estudio. Tal diagnóstico se apoyará en metodologías acordes con los objetivos del mismo y con las limitaciones impuestas por el alcance de las investigaciones y sus resultados. En este sentido, es frecuente utilizar **modelos de simulación** del comportamiento de los contaminantes implicados en los distintos medios afectados (suelos, aguas, aire), así como realizar **evaluaciones cualitativas y/o cuantitativas de los riesgos** que para la salud humana y los ecosistemas plantea el emplazamiento.

Como colofón de estos trabajos, se debe elaborar un documento en el que se exponga la interpretación final a que dan lugar las investigaciones efectuadas, indicando las incertidumbres aún remanentes y evaluando en consecuencia la validez de las conclusiones extraídas. Tal documento, que siempre debe ir acompañado de una descripción completa de los trabajos efectuados y de sus resultados, tendrá entidad propia y servirá como clave de referencia para acometer cualquier tarea posterior.

8. CONTROL DE CALIDAD

El control de calidad es un elemento básico de todo el proceso de investigación de un emplazamiento contaminado y debe abarcar todas las tareas incluidas en un programa de investigación, en especial, los trabajos de campo y la analítica de laboratorio.

A continuación se indican algunos **elementos del control de calidad** asociados a los principales trabajos de investigación descritos anteriormente:

- **Investigaciones de campo y toma de muestras:** registros de datos, procedimientos de trabajo normalizados, controles de equipos y herramientas, formación del personal, cadena de custodia de muestras.
- **Análisis de laboratorio:** desarrollo y adhesión a los principios de buenas prácticas,

uso de procedimientos estándar de operación, establecimiento y adhesión a protocolos para determinaciones específicas, uso congruente y continuado de personal cualificado, uso de equipamiento fiable y en buen estado de mantenimiento, uso de procedimientos de calibración y estándares adecuados, supervisión estricta de todas las operaciones por parte de personal cualificado pero no directamente implicado en los trabajos que supervisa.

- **Informes:** utilización de formatos normalizados, revisión de modelos y cálculos, organización y mantenimiento de archivos informáticos y de papel.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De la exposición anterior cabe extraer algunas conclusiones generales que pueden ser útiles para abordar cualquier investigación de emplazamientos contaminados:

- a) **Los trabajos de investigación no suelen constituir un fin en sí mismos, sino un medio para obtener información** de apoyo a la toma de decisiones.
- b) La investigación suele constituir la **principal fuente de datos para el diagnóstico**, por lo que la validez de las conclusiones de éste va a depender en buena medida de la calidad con que se ha ejecutado aquélla.
- c) Si a lo anterior se une el alto coste de muchos de los trabajos de investigación, queda patente la importancia de acometer los mismos siguiendo una **estrategia** y utilizando una **planificación** cuidadosa (y al tiempo flexible) tendente a optimizar el volumen y la calidad de la información conseguida frente al coste de su obtención.
- d) La optimización de los resultados de la investigación de un emplazamiento contaminado exige a menudo su **ejecución por fases sucesivas**, de modo que el enfoque y contenido de cada una de ellas se van definiendo a la vista de los resultados de la anterior. Este planteamiento es aplicable tanto al conjunto de las investigaciones como al desarrollo de algunas labores específicas (particularmente la toma y análisis de muestras).
- e) Dado que cada emplazamiento presenta unas características particulares y dada la variedad de información que, en general, es preciso obtener para efectuar un diagnóstico adecuado, el **contenido de un programa de investigación** ha de ajustarse a las condiciones específicas de cada emplazamiento. En todo caso, tal contenido ha de ser **coherente con los objetivos últimos** del estudio en que se encuadra y ha de **contemplar las limitaciones operativas, temporales y presupuestarias** inherentes al estudio.
- f) El desarrollo con garantías de éxito de un programa de investigación de un emplazamiento contaminado requiere contar con la participación de un **equipo multidisciplinar** de profesionales familiarizados con este tipo de trabajos y con las diversas técnicas y procedimientos empleados para su ejecución. La capacidad de **adoptar planteamientos flexibles y afrontar y resolver situaciones imprevistas** constituyen requisitos adicionales para toda persona que se integre en el equipo de trabajo.

10. BIBLIOGRAFÍA

10.1 Documentos

- *ASTM. 1995. Standard guide for risk-based corrective action applied at petroleum release sites. American Society for Testing and Materials.*
- *ASTM. 1998. Standard practice for environmental site assessment (phase 2). E1903-97.*
- *ASTM. 2000. Standard guide for risk-based corrective action.*
- *ASTM. 2000. Standard practice for environmental site assessment (phase 1) E1527-00.*
- *British Standards. 2001. Investigation of potentially contaminated sites – Code of Practice. BS 10175:2001. BSI, Reino Unido.*
- *CARACAS. 1998. Concerted action on risk assessment for contaminated sites in the European Union (1996 – 1998). Volume 1: Scientific Basis. LQM Press.*
- *CARACAS. 1998. Concerted action on risk assessment for contaminated sites in the European Union (1996 – 1998). Volume 2: Policy Framework. LQM Press.*
- *CSA. 1994. Phase 1 Environmental Site Assessment. CSA Standard Z768-94. Canadá.*
- *CSA. 2000. Phase 2 Environmental Site Assessment. CSA Standard Z769-00. Canadá.*
- *CSA. Noviembre 2001. Preliminary investigation. CSA Standard Z768-01. Canadá.*
- *Custodio, E.; Llamas, M.R. 1983. Hidrología Subterránea. Ed. Omega, Barcelona.*
- *DEPA. 1999. Danish Environmental Protection Agency. Remediation of contaminated sites. Dinamarca.*
- *DEPA. 2002. Miljø- og Energiministeriet, Miljøstyrelsen. Oprydning på forurenede loka-liteter. Vejledning fra Miljøstyrelsen, nr. 7 (Guidelines on Remediation of contaminated sites, No 7). Dinamarca.*
- *DIN (Deutsches Institut für Normung). 2002. Environmental assessment of sites and organizations. DIN ISO 14015. Alemania.*
- *Domenico, P.A. and Schwartz, F.W. 1990. Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley & Sons.*
- *Eduardo de Miguel, et al. 2002. Determinación de niveles de fondo y niveles de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad Autónoma de Madrid. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Medio Ambiente. Terrenos contaminados, nº 2. Madrid.*
- *IHOBE, S.A. 1998. Guía metodológica para la Investigación de la contaminación del suelo. Estudio Histórico y diseño de muestreo. Gobierno Vasco.*
- *IHOBE, S.A. 1998. Guía metodológica para la Investigación de la contaminación del suelo. Calidad de Suelo, Valores Indicativos de Evaluación. Gobierno Vasco.*
- *IHOBE, S.A. 1998. Guía metodológica para la Investigación de la contaminación del suelo. Toma de muestras. Gobierno Vasco.*
- *IHOBE, S.A. 1998. Guía metodológica para la Investigación de la contaminación del suelo. Análisis químico. Gobierno Vasco.*
- *IHOBE, S.A. 1998. Guía metodológica para la Investigación de la contaminación del suelo. Seguridad para la investigación y recuperación de suelos contaminados. Gobierno Vasco.*
- *IHOBE, S.A. 2000. Guía técnica de Investigación de la contaminación del suelo. Planes de actuación en vertederos abandonados. Gobierno Vasco.*
- *IHOBE, S.A. 2002. Manual práctico para la investigación de la contaminación del suelo. Gobierno Vasco.*

- *IHOBE, S.A. 2006. Guía técnica para la aplicación de modelos informáticos para el transporte y el flujo de contaminantes en el agua subterránea. Gobierno Vasco.*
- *IHOBE, S.A. 2006. Guía técnica para la evaluación y gestión de la contaminación del suelo por tanques de almacenamiento subterráneos. Gobierno Vasco.*
- *Kaifer, M.J., Aguilar, A., et al. 2004. Guía de investigación de la calidad del suelo. Plan Regional de Actuación en materia de Suelos Contaminados de la Comunidad de Madrid (2001-2006). Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Comunidad de Madrid.*
- *Karklins, Steve. 1996. Groundwater Sampling Desk Reference. Wisconsin Department of Natural Resources. Bureau of Drinking Water and Groundwater.*
- *López Jimeno, C et al. 2000. Manual de sondeos. Tecnología de perforación. Ed. Carlos López Jimeno.*
- *McMahon, A., Heathcote, J., Carey, M., Erskine, A. 2001. Guide to good practice for the development of conceptual models and the selection and application of mathematical models of contaminant transport processes in the subsurface. National Groundwater & Contaminated Land Centre. Environment Agency. UK. Report NC/99/38/2.*
- *NNI. 1999. Survey Strategy for soil investigation NEN 5740. NNI, Holanda.*
- *NNI. 1999. Guidance on the preliminary study for preliminary site investigation, first investigation and main investigation. NVN 5725. NNI, Holanda.*
- *OVAM. 2002. Standard procedure for environmental site assessment. Bélgica.*
- *Schroeder et al. 1994. The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model, handbook and documentation. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station – USEPA.*
- *SDU. 1993. Protocol voor het Nader onderzoek deel 1. (Second phase investigation). SDU, La Haya, Holanda.*
- *SDU. 1995. Protocol bodemonderzoek Milieuvergunning en BSB. (Base Line Study). La Haya, Holanda.*
- *TPHCGW. 1998. Analysis of Petroleum Hydrocarbons in Environmental Media. Volume 1. Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series, Massachusetts.*
- *TPHCGW. 1999. Human Health Risk-Based Evaluation of Petroleum Release Sites: Implementing the Working Group Approach. Volume 5. Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series, Massachusetts.*
- *UNE-EN ISO 5667-3. 1996. Calidad de aguas. Muestreo. Parte 3: Guía para la conservación y la manipulación de muestras. AENOR.*
- *UNE-EN ISO 10381-1. Soil quality – sampling. Part 1: Guidance on the design of sampling programs.*
- *UNE-EN ISO 10381-2. Soil quality – sampling. Part 2: Guidance on sampling techniques.*
- *UNE-EN ISO 10381-3. Soil quality – sampling. Part 3: Guidance on safety.*
- *UNE-EN ISO 10381-4. Soil quality – sampling. Part 4: Guidance on the procedure for the investigation of natural, near-natural and cultivated sites.*
- *UNE-EN ISO 10381-5. Soil quality – sampling. Part 5: Guidance on investigation on soil contamination of urban and industrial sites.*
- *USEPA. 1991. Seminar Publication. Site Characterization for Subsurface Remediation. EPA/625/4-91/026*
- *USEPA. 1991. Description and Sampling of Contaminated Soils. A Field Pocket Guide. EPA/625/12-91/002*
- *USEPA. 1992. Preparation of Soil Sampling Protocols: Sampling Techniques and Strategies. EPA/600/R-92/128*
- *USEPA. 1993. Data Quality Objectives for Superfund: Interim Final Guidance. EPA.*

- *USEPA. 1995. User's guide for the Industrial Source Complex (ISC3) dispersion models. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, Emissions, Monitoring, and Analysis Division. Research Triangle Park, North Carolina 27711. EPA-454/B-95-003a.*
- *USEPA. 1996. Soil Screening Guidance: User's Guide. Publication 9355.4-23 EPA.*
- *USEPA. 1996. Soil Screening Guidance: Technical Background Document. EPA/540/R95/128*
- *USEPA. 1996. Low-flow (minimal drawdown). Groundwater sampling procedures. EPA/540/S-95/504.*
- *USEPA. 1997. Field Analytical and Site Characterization Technologies Summary of Applications. EPA-542-R-97-011*
- *USEPA. 1997. Expedited Site Assessment Tools For Underground Storage Tank Sites. A Guide For Regulators. EPA 510-B-97-001*
- *USEPA. 1999. Improving Site Assessment: Combined PA/SI Assessments. EPA/540/F-98/038*
- *USEPA. 2000. Guidance for the Data Quality Objective Process. EPA QA/G-4. EPA/600/R-96/055*
- *USEPA. 2001. Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites. Peer Review Draft. OSWER 9355.4-24.*
- *Voss. 1984. A finite-element simulation model for saturated-unsaturated, fluid-density dependent ground-water flow with energy transport or chemically-reactive single-species solute transport. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 84-4369, 409.*
- *Yeh. 1981. Analytical Transient One-, Two-, and Three-Dimensional (AT123D) Simulation of Waste Transport in an Aquifer System. Oak Ridge National Laboratory (ORNL). USA.*



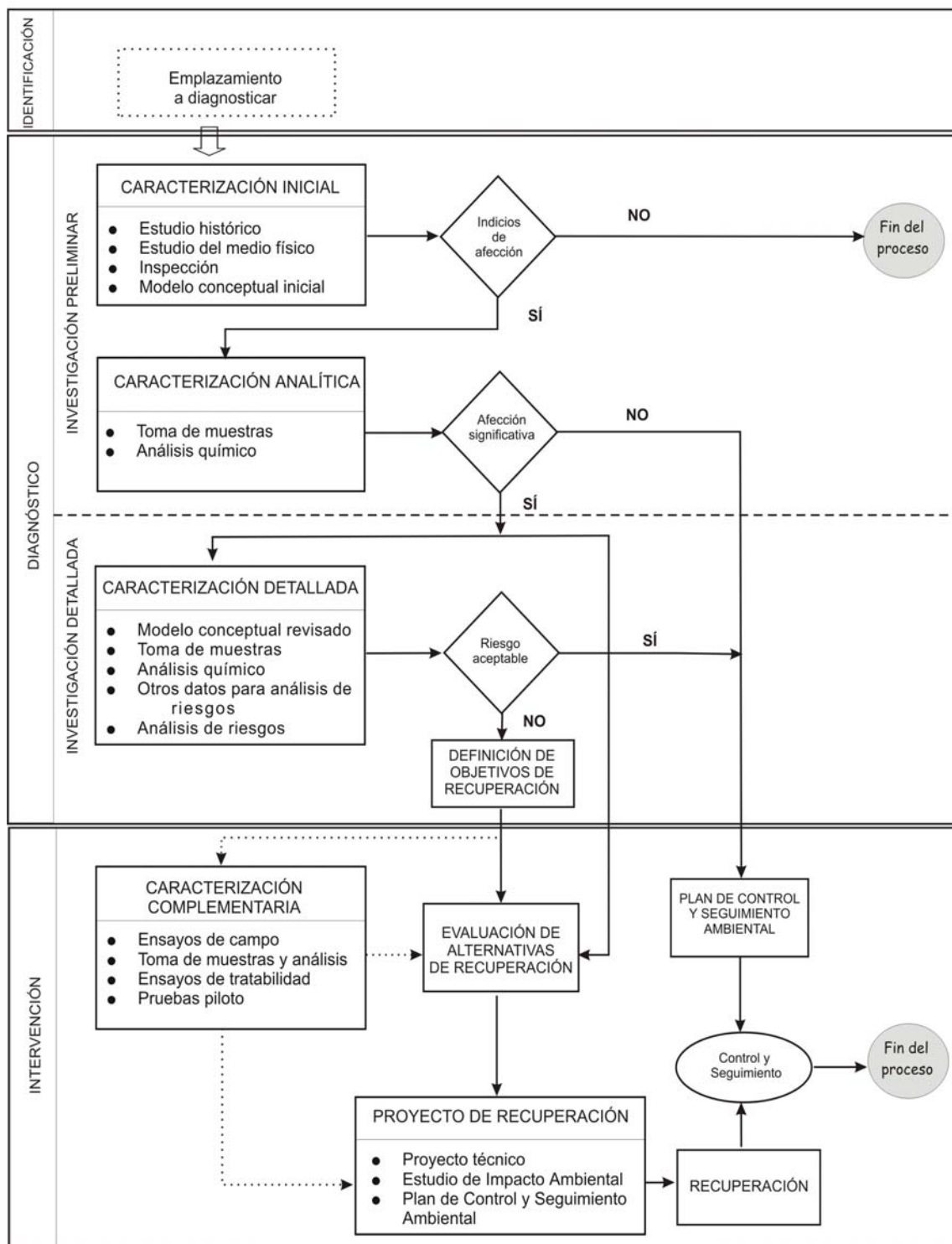
10.2 Direcciones en Internet

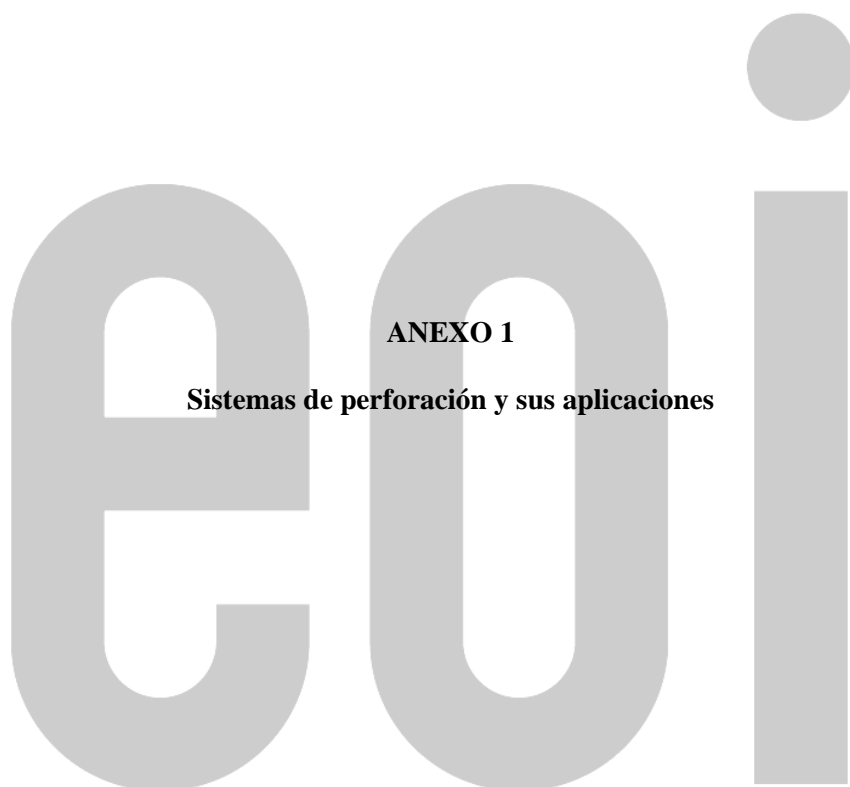
ORGANISMOS Y ASOCIACIONES SUPRANACIONALES	
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)	http://www.unep.org/
Agencia Europea de Medio Ambiente	http://www.eea.eu.int/
The Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies in Europe (CLARINET)	http://www.clarinet.at/
Concerted Action on Risk Assessment for Contaminated Sites in the European Union (CARACAS)	http://www.caracas.at/
European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals (ECETOC)	http://www.ecetoc.org
European Chemicals Bureau (ECB)	http://ecb.jrc.it/
Organización Mundial de la Salud (OMS)	http://www.who.int/es
Internacional Agency for Research on Cancer (IARC)	http://www.iarc.fr/
The International Programme on Chemical Safety (IPCS)	http://www.who.int/ipcs/en
International Organization for Standardization (ISO)	http://www.iso.org/
The oil companies' European association for environment, health and safety in refining and distribution (CONCAWE)	http://www.concawe.be/

ORGANISMOS ESPAÑOLES	
Ministerio de Medio Ambiente	http://www.mma.es
Centro Nacional de Referencia de Suelos. Instituto Geológico y Minero de España (IGME)	http://www.igme.es/internet/RecursosMinerales/nacionales-referencia/cnrs.htm
Generalidad de Cataluña. Departamento de Medio Ambiente y Vivienda. Agencia de Residuos de Cataluña	http://www.arc-cat.net/altres/sols/
Comunidad de Madrid. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio	http://www.madrid.org
Gobierno Vasco. Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente. IHOBE, Sociedad Pública de Gestión Ambiental	http://www.ihobe.net

ORGANISMOS Y ASOCIACIONES NACIONALES DE OTROS PAÍSES		
Alemania	Federal Environmental Agency (UBA)	http://www.uba.de/altlast/web1/estart.htm
	Instituto Alemán de Normalización (DIN)	http://www2.beuth.de/index_en.php3
Canadá	Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME)	http://www.ccme.ca
Dinamarca	Danish Environmental Protection Agency	http://www.mst.dk
Estados Unidos de América	Federal Environmental Protection Agency (USEPA) - Home	http://www.epa.gov
	USEPA - Remediation and Characterization Innovative Technologies (EPA REACH IT)	www.epareachit.org
	USEPA - Federal Remediation Technologies Roundtable. The Field Sampling and Analysis Technologies Matrix	www.frtr.gov
	USEPA - Field Analytic Technologies Encyclopedia	www.fate.clu-in.org
	Department of Energy. Risk Assessment Information System (RAIS)	http://risk.lsd.ornl.gov/index.shtml
	American Society for Testing and Materials (ASTM)	http://www.astm.org/
	American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)	http://www.acgih.org/home.htm
	Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group (TPHCWG)	http://www.aehs.com/publications/catalog/contents/tph.htm
	California Environmental Protection Agency (CalEPA)	http://www.calepa.ca.gov
	Massachusetts Department of Environmental Protection (MADEP)	http://www.mass.gov/dep/dephome.htm
	Texas Natural Resources Conservation Commission	http://www.tnrcc.state.tx.us
	American Petroleum Institute (API)	http://api-ec.api.org/frontpage.cfm
Flandes (Bélgica)	Public Waste Agency of Flanders (OVAM)	http://www.ovam.be/jahia/Jahia/pid/30
Francia	Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (ADEME)	http://www.ademe.fr/entreprises/Cible-SitesPollues.htm
	Asociación Francesa de Normalización (AFNOR)	http://www.boutique.afnor.fr
	Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)	http://www.brgm.fr/
Holanda	Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM)	http://www.vrom.nl
	National Institute of Public Health and the Environment (RIVM)	http://www.rivm.nl
Italia	Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (ANPA)	http://www.sinanet.anpa.it/
Noruega	Norwegian Pollution Control Authority (SFT)	http://www.sft.no/english/
Reino Unido	Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA)	http://www.defra.gov.uk
Suecia	Swedish Environmental Protection Agency	http://www.internat.naturvardsverket.se/

Fig. 1.- Esquema general de gestión de los suelos contaminados en la Comunidad de Madrid





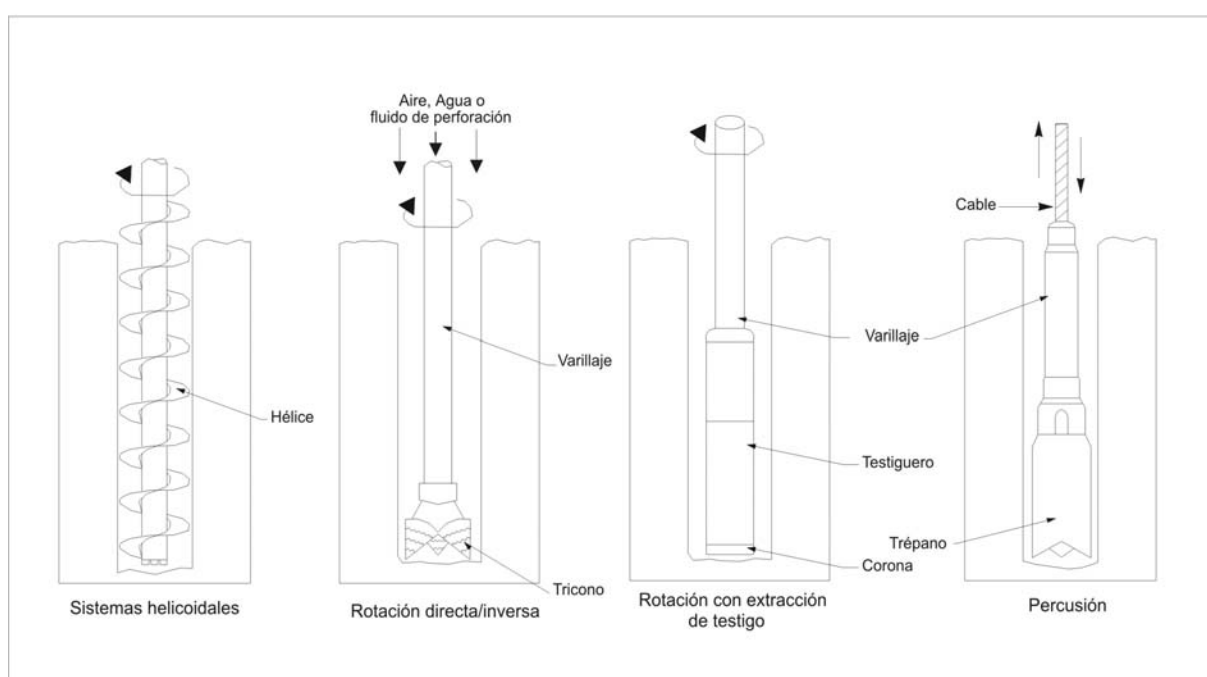
ANEXO 1

Sistemas de perforación y sus aplicaciones

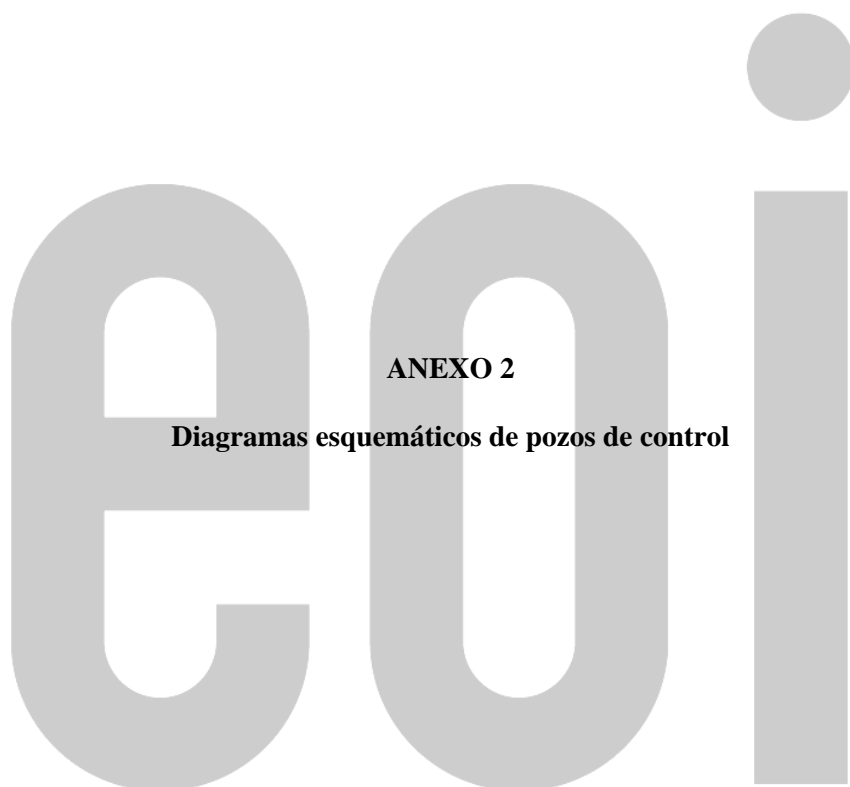
Equipo de perforación	Tipo de suelo aplicable	Profundidad (cm)	Díámetro de sondeo (mm)	Posible infiltración pozos de control	Funcionamiento	Grado de alteración de la muestra	Descripción de la estratificación (per fil)	Volumen de muestra por mancha (cm ³)	Principio operativo	Tipo de muestra
SONDEOS MANUALES										
EMBUDO	Suelos de todo tipo excepto las arenas secas	5-15	25	No	Manual	Muy bajo	Medio	15-40	Introducción en el suelo y extracción de forma continuada en los distintos puntos a muestrear	Cojunta
SONDA HEDEMAN	Todo tipo de suelos húmedos y cohesivos	100-150	40-200	No	Manual	Bajo	Medio	140-350	Giro y subida cada 20 cm	Individual
SONDA DE MEDIA CAÑA	Suelos cohesivos blandos y húmedos	100	20-60	No	Manual	Muy bajo	Buena	300	Introducción de la longitud total de la sonda por golpes, giro y subida	Individual
SONDA RIVERSIDE	Suelos cohesivos, duros y compactos, con gravas	100-150	50-140	No	Manual	Medio	Medio	100-280	Giro y subida cada 20 cm	Individual
SONDA PARA GRAVAS	Suelos con contenido en gravas	100-150	70-140	No	Manual	Alto	Baja	Variable	Giro y subida	Individual
SONDA SUELOS ARENOSOS	Suelos arenosos secos	100-150	70	No	Manual	Bajo	Baja	Variable	Introducción en el suelo y extracción continuada	Cojunta
SONDA DE PISTÓN	Suelos poco cohesivos bajo nivel freático	500	40	No	Manual/aire	Muy bajo	Buena	2500	Introducción de la sonda a la profundidad adecuada, selección por pédon y posterior extracción	Individual
SONDA MANUAL HELICOIDAL	Suelos densos, cohesivos, compactos	100-150	12-55	No	Manual	Alto	Baja	Variable	Giro y subida cada 20 cm	Individual
SONDEOS LIGEROS										
SONDA HELICOIDAL	Soleras de hormigón u otro tipo de cubiertas duras	50	70-80	No	Mecánico	Alto	Baja	Variable	Taladro a rotoperforación	Individual
SONDA ACANALADA	Todo tipo de terrenos	1000	25-34	No	Mecánico	Muy bajo	Buena	Función de la longitud y diámetro de la sonda	Introducción de sondas a percusión y extracción de las mismas mediante gato	Individual
SONDA ACANALADA REFORZADA	Todo tipo de terrenos	1000	38-100	No	Mecánico	Muy bajo	Muy buena	Función de la longitud y diámetro de la sonda	Introducción de sondas a percusión y extracción de las mismas mediante gato	Individual

	PERCUSIÓN	ROTACIÓN CON CORONAS	ROTACIÓN CON CIRCULACIÓN DIRECTA	ROTACIÓN CON AIRE	ROTACIÓN HELICOIDAL	ROTOPERCUSIÓN HELICOIDAL	POZOS HINCA NEUMÁTICA
Aplicabilidad según tipo de suelo	Todo tipo de suelos en suelos no consolidados	Problemas en suelos poco cohesivos	Problemas en rellenos heterométricos y depósitos incoherentes	Problemas en suelos plásticos (arcillas)	Suelos relativamente cohesivos. No atraviesa gravas de gran tamaño	Suelos consolidados. Rellenos con grandes bloques	Arenas y gravas finas poco cohesivos
Profundidad	Sin limitación	Sin limitación	Sin limitación	Sin limitación	~ 30-40 m	Sin limitación	< 30 m
Ø Perforación (en mm)	200-600	55-116	115-320	115-320	Pediválente. Válido para grandes diámetros	150-380 mm	< 55 mm
Posible instalación de pozos de control	Si	≤ 3°	Si	Si	Si	Si	< 2°
Grado de alteración de muestras	Degradación mecánica total	Bajo	Degradación mecánica total	Degradación mecánica total	Regular a baja	Alto con martillo. Bajo con tema de muestras	No hay toma
Testificación continua de las muestras	Difícil	Buena	Difícil. No siempre se obtienen recuperaciones totales	Difícil. No siempre se obtienen recuperaciones totales	Buena	Deficiente	Nula
Tipo de muestra	Detritus y testigo	Testigo	Detritus y testigo	Detritus	Detritus y testigo	Detritus	No hay muestreo
Registro del perfil per forado	Buena	Muy buena	Buena-Regular	Buena-Regular	Regular	Buena-Regular	Nulo
Medios auxiliares	No necesita	Bomba lodos Aporte de agua	Bomba lodos Aporte de agua	Compresor aire	No necesita	Compresor aire	No necesita
Movilidad, accesibilidad	Media	Alta	Baja	Alta	Alta	Alta	Alta
Superficie ocupada	Media	Baja	Alta	Baja	Baja	Baja	Baja
Comentario	Método lento pero pediválente, no requiere aditivos	Método ideal para muestreo continuo. Complementario con otros métodos de rotación	Avance rápido. No recomendable la utilización de aditivos bentoníticos	Avance muy rápido. No apto para zonas con contaminantes movilizables	Avance aceptable. Gran movilidad. No permite observaciones piezométricas durante la perforación	No válido para zonas con contaminantes movilizables. Se pueden tomar testigos usando o tomamuestras propios de métodos de rotación	Uso poco recomendado. Puede ser válido para muestreo de gases

Fig. 4.- Esquema de los diferentes sistemas de perforación

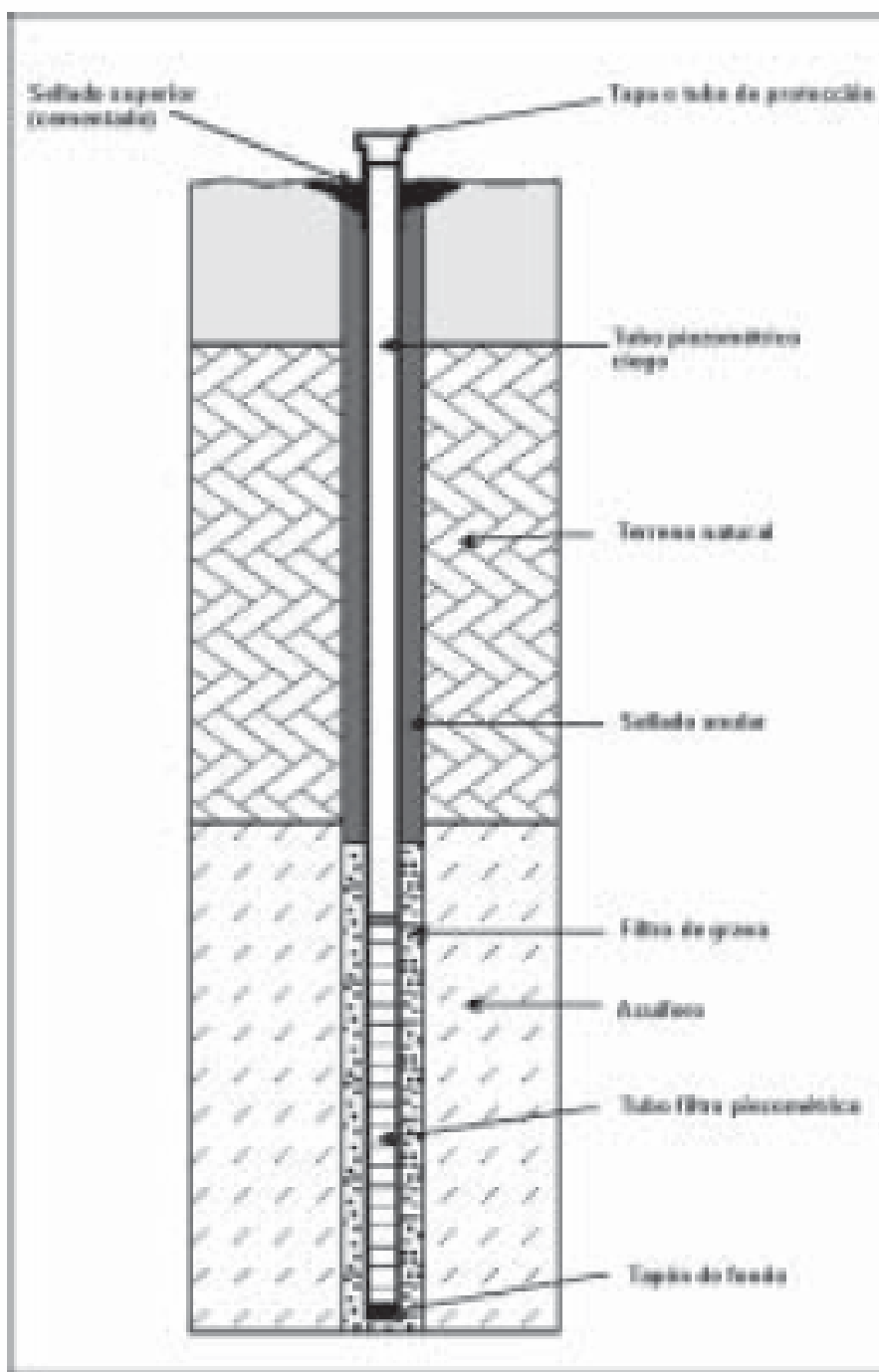


Fuente: modificado de EPA, 1991a

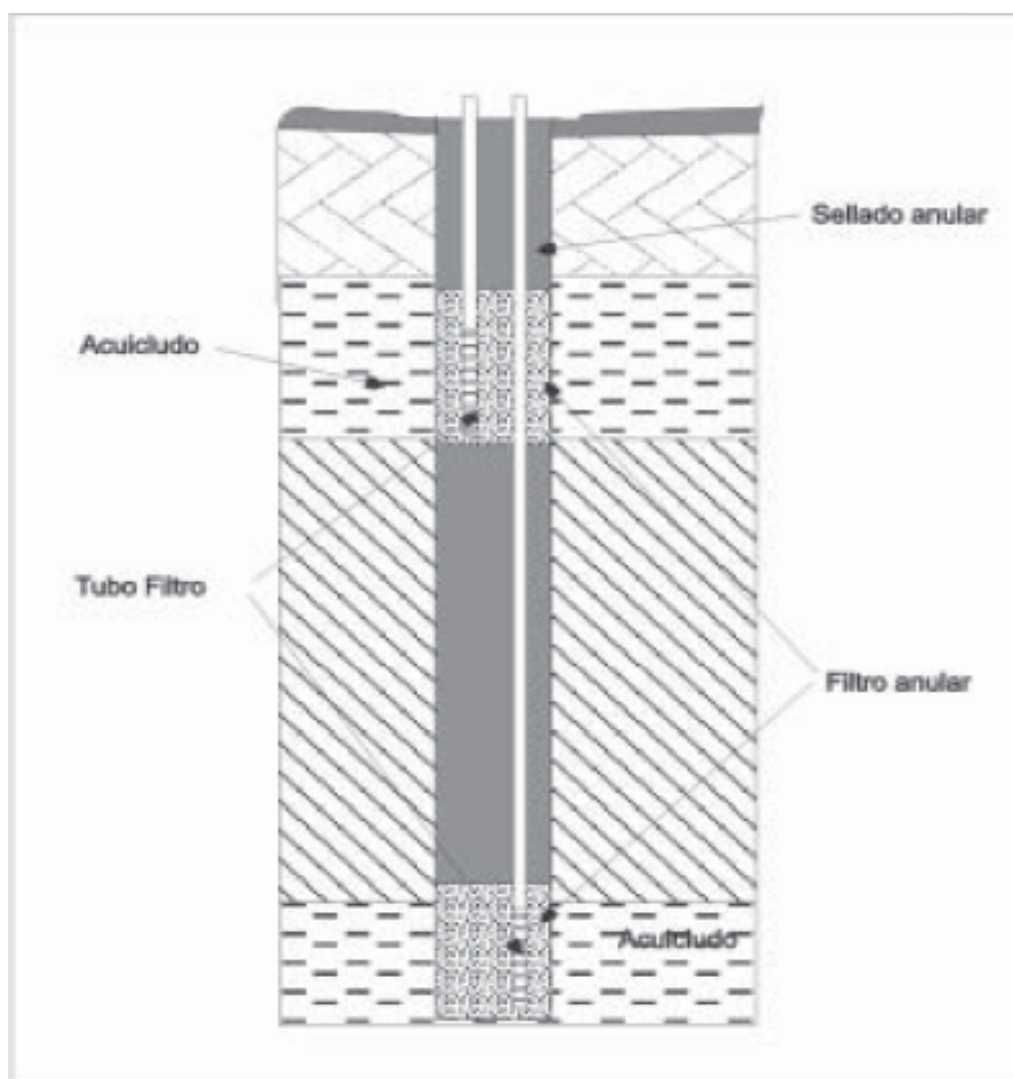


ANEXO 2

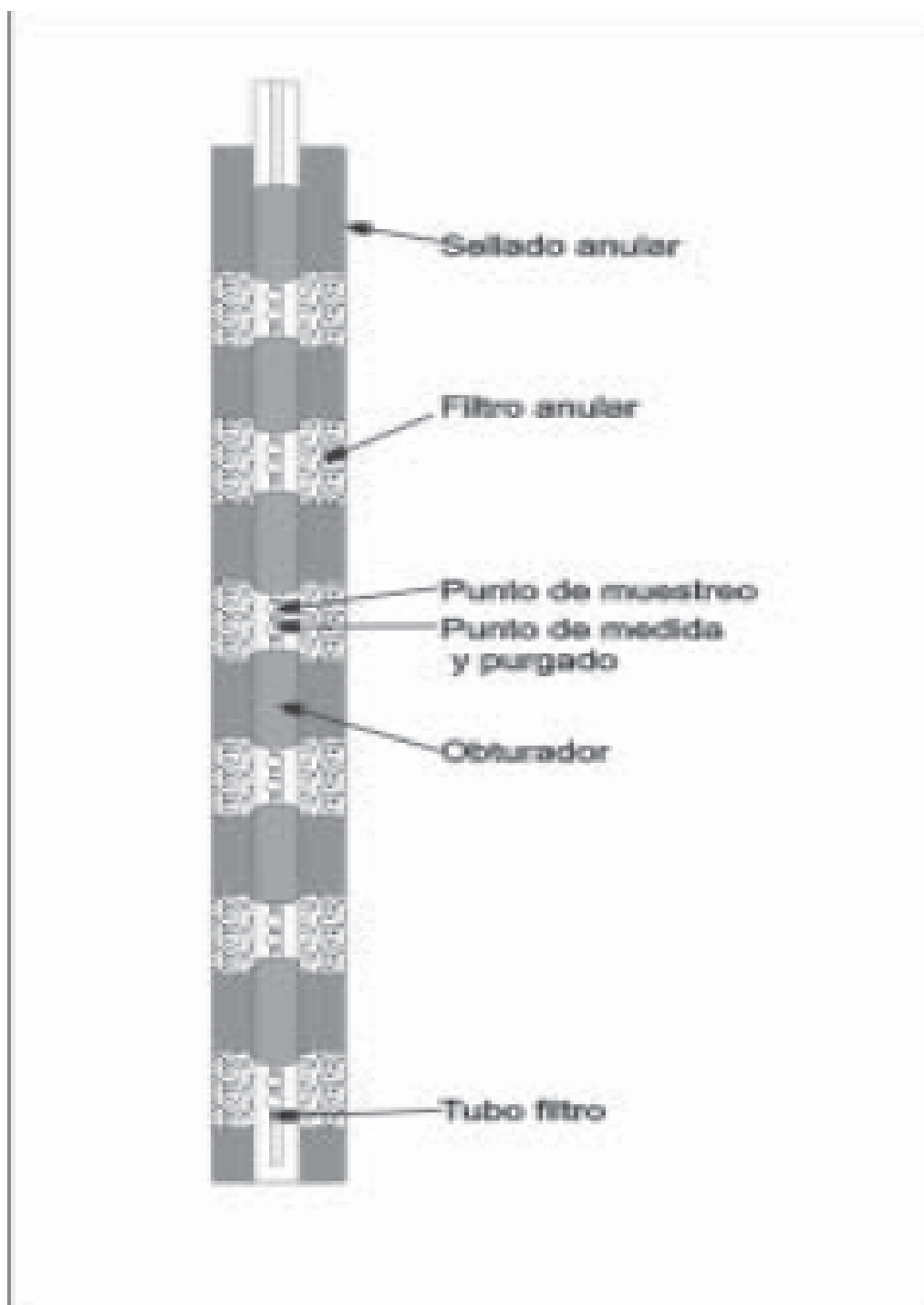
Diagramas esquemáticos de pozos de control



Pozo de control simple



Pozo de control anidado

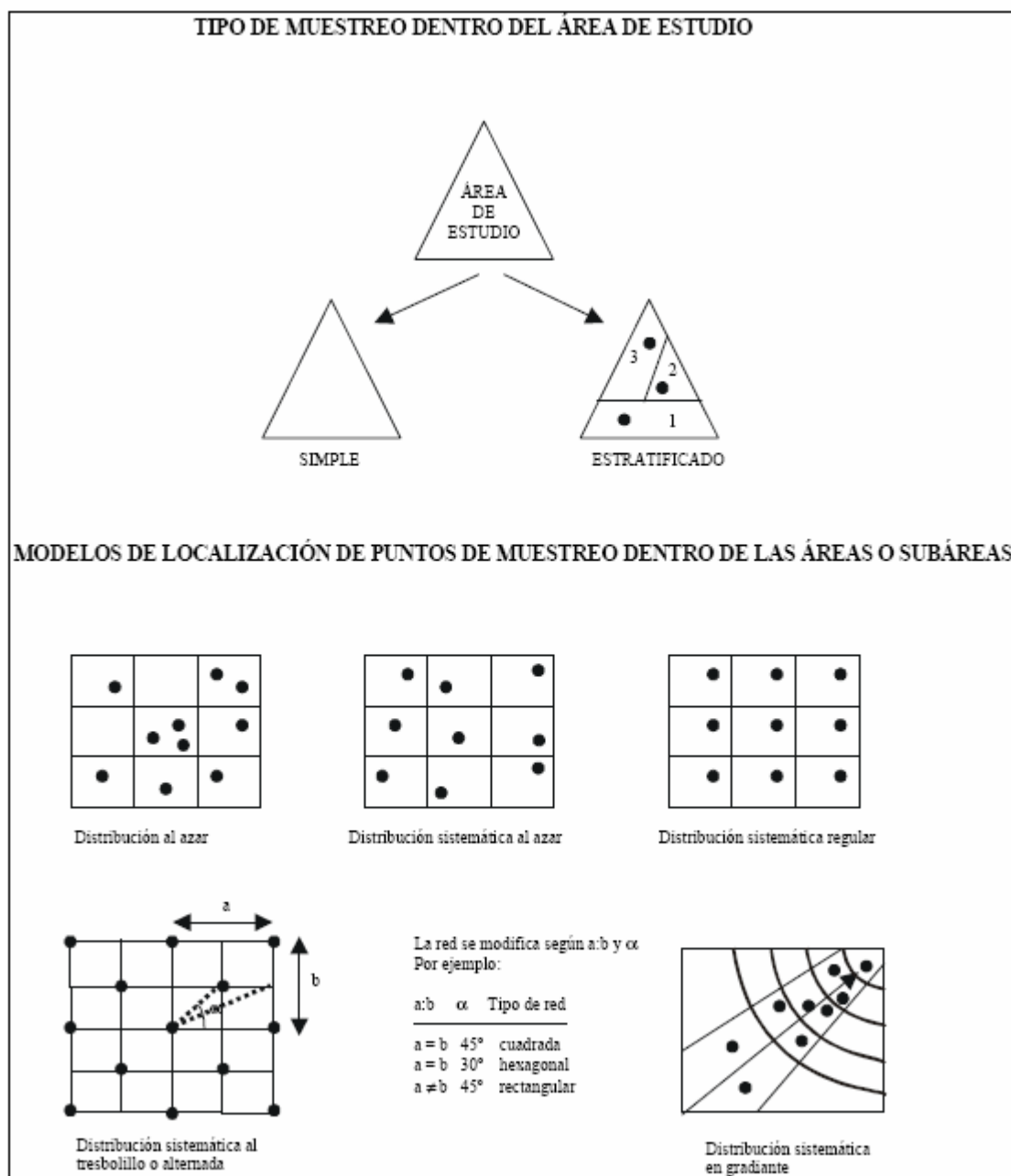


Pozo de control con muestreo a varias profundidades

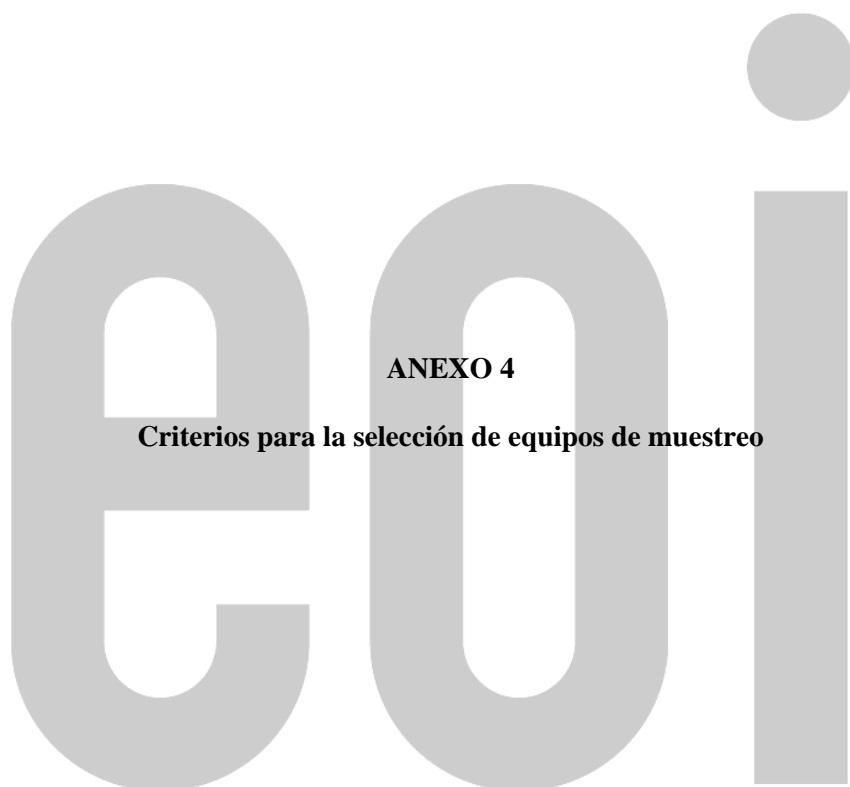


ANEXO 3

Modelos de localización de puntos de muestreo en suelos



Tipos de muestreo y modelos de localización de puntos de muestro en suelo



ANEXO 4

Criterios para la selección de equipos de muestreo

Método de perforación	Método de muestreo	Tipo de muestra	Compacción de la muestra	Grado de alteración mecánica de la muestra	Utilización de aditivos para el muestreo	Incidencia de la utilización de aditivos en la calidad de muestreo	Observaciones
ROTACIÓN	Sacatesligos de pared sencilla	Testigo cilíndrico	Baja	Media-Baja	Agua o lodo	Baja-Nula	Los aditivos se usan una vez que el sacatesligo está en el exterior para recuperar la muestra
	Sacatesligos de pared doble	Testigo cilíndrico	Baja	Media-Baja	Ninguno	-	Se recomienda un diámetro de perforación mayor de 101 mm
	Sacatesligos extraíble	Testigo cilíndrico con cable	Baja	Media	Agua o Lodos	Media	Muestreo rápido. No permite la adaptación de tomamuestras para la obtención de muestras inalteradas
	Sacatesligos para arenas y gravas	Testigo cilíndrico	Baja-Media	Media	Aire	Media	De poco interés debido al uso de aditivos y a los grandes diámetros requeridos para la toma de muestra
ROTACIÓN CON BARRERAS HELICOIDALES	Tomamuestras de pared gruesa	Testigo cilíndrico	Baja	Baja	Ninguno	-	Excelente calidad de muestreo
	Tomamuestras Shelby	Testigo cilíndrico	Casi nula	Baja	Ninguno	-	Excelente calidad de muestreo. Recuperación problemática en suelos poco cohesivos
	Barreiras helicoidales huecas	Testigo	Media	Alta-Media	Ninguno	-	Muestras mecánicamente alteradas
	Tomamuestras cilíndrico	Testigo cilíndrico	Media	Media-Baja	Ninguno	-	Buena calidad de muestreo
PERCUSIÓN	Sacatesligos a percusión	Testigo cilíndrico	Elevada	Media-Alta	Agua	Baja-Media	Muestras con elevado grado de compactación. El registro de profundidades reales de muestreo es muy dificultoso
	Cuchetas y vauluzas	Derritus	-	Muy alta	Agua o ninguno	Baja	Muestras mecánicamente muy alteradas
ROTOPERCUSIÓN NEUMÁTICA	Sacatesligos y tomamuestras de rotación	Testigo cilíndrico	Baja-Media	Baja-Media	Aire Agua o Lodos Ninguno	Media Media -	Los sacatesligos y tomamuestras son los descritos para rotación. Su adaptación requiere un periodo de operación alto
	Recuperación de ritpos odetrutis	Derritus	-	Muy alta	Aire	Baja	Muestras mecánicamente muy alteradas

Equipos de muestreo de suelos en sondeos mecánicos y ligeros

SISTEMA O EQUIPO DE MUESTREO	VENTAJAS	INCONVENIENTES
BAILER (TOMAMUESTRAS DE VÁLVULA DE BOLA)	<ul style="list-style-type: none"> • Disponible en diversos materiales y tamaños, peso reducido • No necesita fuente de energía accesorio • Costes muy reducidos, modelos desechables • Posibilidad de individualizar su uso para cada pozo de control • Escasa pérdida de orgánicos volátiles en su interior • Fácilmente disponible • Fácil preparación y uso sin experiencia previa • Rápido y simple para purgado de pequeños volúmenes de agua 	<ul style="list-style-type: none"> • No recomendable en pozos profundos o de recuperación alta, pues se debe emplear mucho tiempo para la extracción • La transferencia entre bailer-recipiente puede causar aireación de la muestra, a menos que se empleen accesorios especiales • El purgado no es realmente continuo, entre que se introduce y extrae el bailer
BOMBA DE PISTÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Peso reducido, portátil • No necesita fuente de energía accesorio • Modelos menores de 2" disponibles • Costes reducidos • Fácil aprendizaje de uso • Caudales de hasta aprox. 25 l/min 	<ul style="list-style-type: none"> • Poco indicada para muestreo de COV's (suele estar diseñada en PVC) • Pérdida de volátiles durante el bombeo y la transferencia de la muestra al recipiente • Elevado tiempo para su cebado y puesta en funcionamiento • Elevado tiempo para bombeo en pozos profundos y muy laborioso en estos casos • Máxima profundidad de bombeo de 30-35 m • Alteración de propiedades de solubilidad de componentes inorgánicos presentes • La descontaminación entre distintos pozos exige tiempos medios de actividad
BOMBA SUMERGIBLE ELÉCTRICA	<ul style="list-style-type: none"> • Portátil, utilizable en un número ilimitado de pozos • Diversos modelos, tamaños, diámetros y costes, amplia difusión • Pueden alcanzar altos caudales de bombeo, incluso posibilidad de variar el caudal de extracción • No requiere cebado • Pueden alcanzar profundidades de bombeo de hasta 80 m aproximadamente 	<ul style="list-style-type: none"> • Voluminosa y pesada en función de su tamaño y de la profundidad del pozo • Costes elevados y necesidad de equipamiento accesorio en función de sus características • Necesaria fuente de energía accesorio • Fácilmente dañada internamente por presencia de limos o sedimentos (abrasión de componentes) • Poco práctica en pozos de reducido diámetro o que necesiten caudales muy reducidos de extracción
BOMBA SUMERGIBLE NEUMÁTICA	<ul style="list-style-type: none"> • Mantiene la integridad de la muestra, alta calidad de muestras • Fácil aprendizaje de uso • Recomendable para muestreo de COV's • Caudal variable 	<ul style="list-style-type: none"> • Difícil de descontaminar en sus partes internas • Profundidades máximas de bombeo de hasta 30-35 m • Necesaria fuente de energía accesorio (compresores de aire eléctricos o de gasolina) • Costes elevados
BOMBA PERISTÁLTICA	<ul style="list-style-type: none"> • Posibilidad de obtención de muestras de calidad alta • Portátil y de reducido peso • Costes reducidos • La bomba no entra en contacto con el agua (no es necesaria la limpieza de ésta) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajos caudales de extracción • Profundidad máxima de bombeo de unos 8 m • Necesita fuente de energía accesorio (batería) • Aplicable a la toma de muestras, normalmente no al purgado

Equipos de muestreo de aguas subterráneas



ANEXO 5

Recomendaciones sobre materiales de envasado y conservación de muestras en campo

	Aguas subterráneas		Suelos	
Sustancia o grupo	Material envase	Conservación campo	Material envase	Conservación campo
I <u>Metales pesados:</u> Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ag, Cd, Sn, Ba, Pb	PE+BG	filtrar 0,45 mm	vidrio	ninguna
Hg	vidrio	filtrar 0,45 mm, HNO ₃ a pH 1 + K ₂ CrO ₇	vidrio	ninguna
Cr (VI)	vidrio	filtrar 0,45 mm, refrigerado	vidrio	ninguna
II <u>Sustancias inorgánicas</u> amonio inorgánico	vidrio+PE	filtrar 0,45 mm, pH2 H ₂ SO ₄	vidrio	ninguna
fluoruros	polietileno	filtrar 0,45 mm cianuros (total)	polietileno	ninguna
	vidrio+PE	filtrar 0,45 mm, a pH 12 con base (2M)	vidrio	
bromuros	vidrio+PE	filtrar 0,45 mm, refrigerado, oscuridad	vidrio	ninguna
fosfatos (disueltos y total)	vidrio+PE	filtrar 0,45 mm, pH2	vidrio	ninguna
nitratos	vidrio+PE	filtrar 0,45 mm	vidrio	sin objeto
nitritos	vidrio+PE	filtrar 0,45 mm	vidrio	sin objeto
III <u>Compuestos aromáticos</u> <u>volátiles</u>	vidrio + teflón	llenado 100%, refrigerado, acidulado	vidrio + teflón	llenado completo
IV <u>Fenoles</u>	BG + teflón	pH 4 con H ₃ PO ₄ + 1g CuSO ₄ -5H ₂ O/l, refrigerar	vidrio + teflón	llenado completo
V <u>Compuestos aromáticos</u> <u>polícíclicos</u>	vidrio ámbar + teflón	llenado 100%, refrigerado (oscuridad)	vidrio + teflón	llenado completo
VI <u>Hidrocarburos clorados</u> <u>volátiles</u>	vidrio + teflón	llenado 100%, refrigerado	vidrio + teflón	llenado completo
VII <u>EOX</u>	vidrio + teflón	llenado 100%, refrigerado	vidrio + teflón	llenado completo
VIII <u>Policlorobifenilos</u> <u>+insecticidas</u> <u>organoclorados</u>	vidrio ámbar+ teflón+disolvente orgánico	llenado 100%, refrigerado (oscuridad)	vidrio + teflón	llenado completo
IX <u>Insecticidas organofosforados</u> <u>y organonitrogenados</u>	vidrio ámbar+ teflón+disolvente orgánico	llenado 100%, refrigerado (oscuridad)	vidrio + teflón	llenado completo
X <u>Cetonas + aldehídos</u>	vidrio + teflón	llenado 100%, refrigerado	vidrio + teflón	llenado completo
XI <u>Aceites minerales</u>	vidrio + teflón	llenado 100%, refrigerado	vidrio + teflón	llenado completo

BG: Vidrio borosilicatado

PE: Polietileno

Teflón: Tapón hermético con interior de teflón

Material de envase y condiciones de conservación en campo de muestras



Grupo de sustancias	Material envase	Procedimiento de limpieza
Metales pesados	vidrio+PE	Enjuagar con HNO_3 y seguidamente con H_2O desionizada
Sustancias inorgánicas (excepto fluoruros)	vidrio+PE	Enjuagar con agua desionizada
Fluoruros	polietileno	Enjuagar con agua desionizada
EOX y fenoles sustituidos	vidrio	Enjuagar con agua destilada y secar a 120°C
PAHs, PCBs, pesticidas organoclorados, organofosforados y organonitrogenados	vidrio opaco	Enjuagar con hexano
Aceites minerales	vidrio	Enjuagar con freón

Normas generales de aclarado de envases de muestras

EOI