

GUÍA DE
INVESTIGACIÓN
DE LA CALIDAD
DEL SUELO

PLAN REGIONAL DE ACTUACIONES EN MATERIA
DE SUELOS CONTAMINADOS DE LA COMUNIDAD DE MADRID

2001-2006

GUÍA DE INVESTIGACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO

GUÍA DE INVESTIGACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO

PLAN REGIONAL DE ACTUACIONES EN MATERIA
DE SUELOS CONTAMINADOS DE LA COMUNIDAD DE MADRID


2001-2006



GUÍA DE INVESTIGACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO

PLAN REGIONAL DE ACTUACIONES EN MATERIA
DE SUELOS CONTAMINADOS DE LA COMUNIDAD DE MADRID

2001-2006

©  Cofinanciación de 46.030,04 € de una inversión total de 54.142,94 €. Instrumento Financiero del Espacio Económico Europeo.

©  CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE
Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO
Comunidad de Madrid

Edita: Dirección General de Promoción y Disciplina Ambiental

Depósito legal: M-46689-2004

Diseño: nea comunicación

Imprime: COIMOFF, S.A.

Tirada: 1.000

Fecha de edición: 2004

 Impreso en papel ecológico TCF

Impreso en España/Printed in Spain


Comunidad de Madrid
CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE
Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO

AUTORES

- M^º Jesús Kaifer Brasero ⁽¹⁾
- Alfonso Aguilar Peña ⁽¹⁾
- M^º del Puy Alonso Martínez ⁽¹⁾
- José M^º Caleyá Sánchez ⁽¹⁾
- Manuel Villarrubia Dunet ⁽¹⁾
- Flip Van Leewe ⁽²⁾
- Martijn Vos ⁽²⁾

⁽¹⁾ - U.T.E. TPA-Covitecma

⁽²⁾ - FUGRO Milieu Consult B.V.

GUÍA de Investigación de la Calidad del Suelo / M. Jesús Kaifer, A. Aguilar, M. Alonso, J. Caleyá, M. Villarrubia, F. Leewe, M. Vos, aut. Madrid: Comunidad de Madrid, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. 2004

Contaminación de suelos. Caracterización. Investigación preliminar. Investigación detallada.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	15
2. ANTECEDENTES	19
2.1. La protección del suelo en el ámbito internacional.	19
2.2. La gestión de la contaminación del suelo en la Comunidad de Madrid.	20
3. PROCESO DE GESTIÓN DE LOS SUELOS CONTAMINADOS EN LA COMUNIDAD DE MADRID	23
4. OBJETIVOS DE LA GUÍA	29
5. GLOSARIO	31
6. FASE 1: INVESTIGACIÓN PRELIMINAR DE LA CALIDAD DEL SUELO	37
6.1. Introducción.	37
6.2. Objetivos.	37
6.3. Proceso de la Investigación Preliminar de la calidad del suelo.	37
6.4. Caracterización inicial.	39
6.4.1. Definición de los objetivos a alcanzar.	39
6.4.2. Estudio histórico del emplazamiento y su entorno.	39
6.4.3. Estudio del medio físico.	43
6.4.4. Desarrollo del modelo conceptual inicial del emplazamiento.	44
6.4.5. Conclusiones del estudio de Caracterización Inicial.	46
6.5. Caracterización Analítica.	46
6.5.1. Definición de la estrategia de obtención de datos.	46
6.5.2. Programa de muestreo y análisis del suelo.	46
6.5.3. Conclusiones para trabajos posteriores.	50
7. FASE 2: INVESTIGACIÓN DETALLADA DE LA CALIDAD DEL SUELO	53
7.1. Introducción.	53

7.2. Objetivos.	53
7.3. Proceso de la investigación detallada.	54
7.3.1. Revisión del Modelo Conceptual inicial.	55
7.3.2. Obtención de datos.	55
7.3.3. Definición del modelo conceptual.	57
7.4. Informe resumen.	59
8. PROGRAMA DE MUESTREO Y ANÁLISIS	61
8.1. Introducción.	61
8.2. Definición de los objetivos del muestreo.	62
8.3. Información de partida.	62
8.4. Diseño de muestreo y toma de muestras.	62
8.4.1. Distribución y número de puntos de muestreo.	63
8.4.2. Profundidad de muestreo.	66
8.4.3. Tipo de muestras.	66
8.4.4. Métodos de muestreo.	67
8.4.5. Conservación, almacenamiento y envasado, etiquetado y transporte de muestras de suelo y de aguas subterráneas.	67
8.5. Medidas de seguridad y salud.	69
9. TÉCNICAS DE EXPLORACIÓN EN LA INVESTIGACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS	73
9.1. Métodos no intrusivos.	73
9.2. Técnicas de investigación de tipo intrusivo.	75
9.3. Métodos de determinación de los parámetros hidráulicos.	80
9.4. Métodos de muestreo de aguas subterráneas.	81
9.5. Técnicas de muestreo y análisis in situ del gas del suelo.	82
10. TÉCNICAS Y MÉTODOS ANALÍTICOS.	85
11. BIBLIOGRAFÍA	107

TABLAS

Tabla 6.1: Resumen de fuentes de información.	42
Tabla 8.1: Resumen de modelos de distribución de puntos de muestreo.	64
Tabla 8.2: Envases para muestras en investigación de suelos.	68
Tabla 8.3: Medidas de seguridad y salud para investigación de suelos.	70
Tabla 9.1: Comparación de métodos geofísicos.	74
Tabla 9.2: Comparación de técnicas de investigación y muestreo.	76
Tabla 9.3: Comparación de las diferentes técnicas de perforación para construcción de pozos.	77
Tabla 9.4: Tipos de perforación y objetivos de la investigación.	78
Tabla 9.5: Comparación entre materiales para la construcción de piezómetros.	79
Tabla 9.6: Resumen de métodos para la obtención de parámetros hidráulicos.	80
Tabla 10.1: Principales contaminantes en función de la actividad industrial.	85
Tabla 10.2: Resumen de técnicas analíticas.	88
Tabla 10.3: Comparación de técnicas analíticas aplicadas a penetrómetros.	96
Tabla 10.4: Aplicabilidad de técnicas de evaluación del gas del suelo para diferentes compuestos.	97
Tabla 10.5: Métodos y técnicas analíticas para suelos.	98
Tabla 10.6: Métodos y técnicas analíticas para agua.	100

CUADROS

Cuadro 6.1: Investigación Preliminar de la Calidad del Suelo. Síntesis de Tareas.	38
Cuadro 6.2: Datos de interés relativos a la actividad desarrollada en el emplazamiento.	40
Cuadro 6.3: Principales aspectos en el estudio de usos del suelo del entorno.	41

Cuadro 6.4: Resumen de datos de interés para el estudio histórico del emplazamiento y su entorno.	41
Cuadro 6.5: Datos más relevantes para el estudio del medio físico.	44
Cuadro 6.6: Instrumentos y aspectos clave para la visita al emplazamiento.	45
Cuadro 6.7: Datos a incluir en el informe de la investigación preliminar.	50
Cuadro 7.1: Investigación Detallada de la Calidad del Suelo. Síntesis de tareas.	54
Cuadro 7.2: Datos de interés para la predicción de la movilización a través del agua subterránea.	58
Cuadro 8.1: Condicionantes a tener en cuenta durante el diseño de muestreo.	63
FIGURAS	
Figura 3.1: Esquema general de gestión de los suelos contaminados de la Comunidad de Madrid.	24
Figura 6.1: Ejemplo de esquema de funcionamiento de un sistema.	45
Figura 8.1: Modelos de distribución de puntos de muestreo.	65
Figura 9.1: Esquema de los diferentes sistemas de perforación.	77
Figura 9.2: Comparación conceptual de diseño de muestreo de aguas subterráneas.	80
ANEXOS:	
Anexo 1: Listas de chequeo.	110

ABREVIATURAS

AAI	Autorización Ambiental Integrada
AAS	Atomic Absorption Spectrometry (Espectrometría de Absorción Atómica)
AID	Argon-Ionization Detector (Detector por Ionizador de Argon)
Amp	Valoración Amperiométrica
AOX	Absorbable Organic Halides (Compuestos Orgánicos halogenados absorbibles)
ASTM	American Society for Testing and Materials (EE.UU.) (Sociedad americana para pruebas y materiales)
ASV	Anodic Stripping Voltammetry (Voltametría de redisolución anódica).
BTEX	Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos
CG	Cromatografía de Gases
COM	Comunicaciones de la Comisión Europea
COCS	Criterios Orientativos de la Calidad del Suelo
COSVs	Compuestos Orgánicos Semi-Volátiles
COT	Carbono Orgánico Total
COVs	Compuestos Orgánicos Volátiles
CPT	Cone Penetration Test (Penetrómetro)
CT	Coulometric Titrimetry (Valoración coulombimétrica)
CVAAS	Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry (Espectrometría de absorción atómica en vapor frío)
DCP-AES	Direct Current Plasma Atomic Emission Spectrometry (Espectrometría de emisión atómica de plasma directo)
DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto de Normalización de Alemania)
DNAPL	Dense Non Aqueous Phase Liquid (Líquido en fase no acuosa denso)
DQO	Demanda Química de Oxígeno
ECD	Electron Capture Detector (Detector por captura de electrones)
EDB	Ethylene Dibromide (Dibromuro de Etileno)
ELCD	Electrolytic Conductivity Detector (Detector por conductividad electrolítica)
EM	Electromagnetismo
EOX	Extractable Organic Halides (Compuestos orgánicos halogenados extraíbles)
FAAS	Flame Atomic Absorption Spectrometry (Espectrometría de absorción atómica en llama)
FAES	Flame Atomic Emission Spectrometry (Espectrometría de emisión atómica en llama)
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación)
FID	Flame Ionization Detector (Detector de ionización por llama)
FPD	Flame Photometric Detector (Detector fotométrico de llama)
GFAAS	Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry (Espectrometría de absorción atómica en cámara de grafito)
GPR	Ground Penetrating Radar (Georadar)
GC-ECD	Gas Chromatography - Electron Capture Detector (Cromatografía de gases - Detector por captura de electrones)

GC-ELCD	Gas Chromatography - Electrolytic Conductivity Detector (Cromatografía de gases - Detector de conductividad electrolítica)	ppb	Partes por billón
GC-FID	Gas Chromatography – Flame Ionization Detector (Cromatografía de gases - Detector de ionización por llama)	ppm	Partes por millón
GC-FTIR	Gas Chromatography - Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Cromatografía de gases - Detector de espectrometría infrarroja por transformada de Fourier)	SIS	Sistema Integral de Saneamiento
GC-HRMS	Gas Chromatography – High Resolution Mass Spectrometer (Cromatografía de gases - Espectrómetro de masas de alta resolución)	SM	Manual Spectrometry (Espectrometría manual)
GC-MS	Gas Chromatography - Mass Spectrometer (Cromatografía de gases - Espectrómetro de masas)	TEM	Transmission Electron Microscopy (Microscopía de transmisión de electrones)
GC-NPD	Gas Chromatography – Nitrogen/Phosphorus Detector (Cromatografía de gases - Detector de Nitrógeno/Fósforo)	TCD	Thermal Conductivity Detector (Detector por conductividad térmica)
GC-PID	Gas Chromatography - Photoionization Detector (Cromatografía de gases - Detector de fotoionización)	TCE	Tricloroetileno
HGAAS	Hydride Generation Atomic Absorption Spectrometry (Espectrometría de absorción atómica por generador de Hidruros)	TDS	Thermal Desorption Sampler (Muestreador de desorción térmica)
HPLC-UV/vis	High Performance Liquid Chromatography - Ultraviolet/Visible molecular absorption (Cromatografía líquida de alto rendimiento – absorción molecular ultravioleta/visible)	TPH	Total Petroleum Hydrocarbons (Hidrocarburos totales del petróleo)
HPLC-UV/F	High Performance Liquid Chromatography - Ultraviolet/Fluorescence molecular absorption (Cromatografía líquida de alto rendimiento – absorción molecular ultravioleta/fluorescencia)	UE	Unión Europea
HSD	Halogen Specific Detector (Detector específico de halogenados)	UNE	Normas Europeas-Españolas (AENOR)
IC	Ion Chromatography (Cromatografía iónica)	US-EPA	United States Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU.)
ICP-AES	Inductively-Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (Espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente)	UV/VIS	Ultraviolet or Visible molecular absorption spectrometry (Espectrometría de absorción molecular ultravioleta o visible)
ICP-MS	Inductively-Coupled Plasma Mass Spectrometry (Espectrometría de masa de plasma inductivamente acoplado)		
IGME	Instituto Geológico y Minero de España		
IHOBE	Industria Hondakinentzako Bateango Enularaztegia (Sociedad promotora de tratamiento centralizado de residuos industriales)		
IR	Infrared spectrometry (Espectrometría infrarroja)		
ISO	International Organization for Standardization (Organización Internacional para la Estandarización)		
LNAPL	Light Non Aqueous Phase Liquid (Líquido en fase no acuosa ligero o Fase libre)		
LIF	Laser Induced Fluorescence (Fluorescencia inducida por láser)		
MIP	Membrane Interface Probe (Sensor de membrana)		
MS	Mass Spectrometry (Espectrometría de masas)		
NAPL	Non Aqueous Phase Liquid (Líquido en fase no acuosa)		
NEN	Nederlands Normalisatie-instituut (Instituto de Normalización de Holanda)		
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico		
PAH	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (Hidrocarburos policíclicos aromáticos)		
PCB	Polychlorinated Biphenyl (Bifenilos policlorados)		
PID	Photo Ionization Detector (Detector por fotoionización)		
PECC	Programa Europeo sobre el Cambio Climático		
PNUMA	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente		

El suelo, considerado desde la perspectiva de las actividades humanas dirigidas al aprovechamiento de su potencial productivo (agricultura, ganadería, explotación forestal), se ha definido tradicionalmente como “el conjunto de unidades naturales que ocupan las partes de la superficie terrestre que soportan las plantas, y cuyas propiedades se deben a los efectos combinados del clima y de la materia viva sobre la roca madre, en un periodo de tiempo y en un relieve determinado” (Soil Survey Staff, 1951).

Por otro lado, el suelo, como soporte de actividades de carácter urbano, se interpreta más en función de las características y propiedades que condicionan dichas actividades: capacidad portante, erosionabilidad, estabilidad, permeabilidad, facilidad de drenaje, etc. En este caso, el alcance del concepto suelo es más amplio, no limitándose al espesor afectado por las raíces de las plantas, sino incluyendo además todos los materiales no consolidados, meteorizados o alterados de su condición original y situados sobre un lecho rocoso, duro y consolidado.

En el presente documento se entiende por suelo la capa superior de la corteza terrestre, situada entre el lecho rocoso y la superficie, compuesta de partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos. Constituye la interfaz entre la tierra, el aire y el agua, lo que le confiere la capacidad de desempeñar tanto funciones naturales como de uso.

La importancia del suelo radica en las numerosas funciones que desempeña, tanto ambientales como económicas, sociales y culturales. De acuerdo con el documento de la Comisión de la Unión Europea “Hacia una estrategia temática para la protección del suelo” (COM (2002), 179), las principales funciones del mismo son las siguientes:

- El suelo es fuente de alimentos y producción de biomasa. La agricultura y la silvicultura dependen del suelo como soporte físico, así como para el suministro de agua y nutrientes.
- Constituye uno de los principales factores para la protección del agua y de intercambio de gases con la atmósfera, debido a su capacidad de almacenamiento, filtración, amortiguación y transformación de elementos minerales, agua, materia orgánica y sustancias químicas.
- Constituye el hábitat de numerosos organismos que viven tanto en el suelo como sobre él, desempeñando funciones ecológicas esenciales.
- Como entorno físico, el suelo sirve de base a las actividades humanas y constituye un elemento del paisaje y del patrimonio cultural de la humanidad.
- Es fuente de materias primas.

Algunas de las características que diferencian el suelo de otros recursos son las siguientes:

- El suelo es un recurso prácticamente no renovable, con una cinética de degradación rela-

tivamente rápida y, por el contrario, tasas de formación y regeneración extremadamente lentas.

- El suelo tiene una gran capacidad de almacenaje y amortiguación, debida en gran parte a su contenido en materia orgánica. Dicha capacidad está relacionada tanto con el agua, los minerales y los gases como con un gran número de sustancias químicas que pueden acumularse en el suelo. Cuando se superan los umbrales de irreversibilidad de almacenaje y amortiguación de estas sustancias en el suelo, se produce la liberación y distribución de las mismas en otros medios.
- El suelo es un medio vivo con gran biodiversidad. La actividad biológica contribuye a determinar la estructura y fertilidad del suelo y resulta fundamental para que pueda realizar algunas de sus funciones.
- A diferencia del aire y el agua, el suelo es un recurso que está generalmente sujeto a derechos de propiedad.

En el ámbito de la Unión Europea, la degradación del suelo (entendida como la pérdida de la capacidad de realizar las funciones que le son propias) tiene actualmente las siguientes causas principales:

- La erosión: es un fenómeno geológico natural que consiste en el desprendimiento de partículas de suelo por la acción del agua o del viento. Ciertas actividades humanas pueden acelerar las tasas de erosión. Las consecuencias de la erosión son la pérdida de la capacidad del suelo para realizar sus funciones y en último caso su desaparición. La erosión tiene efectos negativos sobre los cursos de agua y sobre los ecosistemas marinos y fluviales.
- La pérdida de materia orgánica: la materia orgánica, producida por la acción lenta de los microorganismos del suelo es de vital importancia para que pueda mantener sus funciones y resulta un factor determinante de resistencia a la erosión y de fertilidad de los suelos. Las actividades agrícolas y forestales tienen una gran incidencia en la pérdida de materia orgánica del suelo, especialmente las explotaciones de carácter intensivo. La disminución de la materia orgánica es especialmente preocupante en las regiones mediterráneas.
- La contaminación: la introducción de agentes contaminantes en el suelo por encima de determinados niveles puede originar consecuencias negativas en la cadena alimentaria y por tanto en la salud humana, los ecosistemas y los recursos naturales. La evaluación de sus efectos requiere considerar no sólo su concentración, sino también su comportamiento ambiental y los mecanismos de exposición. Generalmente se distingue entre la contaminación procedente de fuentes puntuales y la causada por fuentes difusas.

La contaminación puntual proviene de fuentes delimitadas como la minería, las instalaciones industriales, los vertederos y otras instalaciones, tanto en funcionamiento como tras su cierre.

La contaminación difusa está relacionada principalmente con la deposición atmosférica, determinadas prácticas agrícolas y el tratamiento inadecuado de lodos de depuradora y aguas residuales.

- El sellado: la cubrición del suelo para la construcción de edificios, carreteras u otros fines reduce la superficie disponible para realizar sus funciones como la absorción de agua de lluvia para su infiltración, modifica los flujos de agua y contribuye a agravar la fragmentación de la biodiversidad. El sellado del suelo es prácticamente irreversible y está muy relacionado con las estrategias de ordenación del territorio.
- La compactación: se produce por la presión mecánica ejercida sobre el suelo como consecuencia del uso de maquinaria pesada y del pastoreo excesivo. La compactación redu-

ce la porosidad del suelo por lo que pierde parcial o totalmente su capacidad de absorción, deteriora la estructura edáfica del mismo, limita el crecimiento de las raíces, la fertilidad, la actividad biológica y la estabilidad. En consecuencia se incrementa el volumen de aguas de escorrentía superficial y por tanto el riesgo de erosión.

- La reducción de la biodiversidad: el suelo es el hábitat de numerosos organismos vivos y, a su vez, constituye la base sobre la que se desarrollan los ecosistemas terrestres. Los microorganismos que habitan el suelo desempeñan un papel fundamental en el mantenimiento de su fertilidad ya que garantizan sus propiedades físicas, químicas y biológicas. La pérdida de biodiversidad del suelo lo hace más vulnerable a la erosión y a otros procesos de degradación.
- La salinización: consiste en la acumulación de sodio, magnesio y calcio en los suelos, provocando una reducción importante de su fertilidad. Suele estar vinculada a los terrenos de regadío, principalmente en zonas de escasas precipitaciones y elevados niveles de evapotranspiración. En las zonas costeras, la salinización puede estar también vinculada a la sobreexplotación de las aguas subterráneas.
- Ciertas catástrofes naturales: las inundaciones y los deslizamientos de tierras están estrechamente relacionados con la gestión de suelos. A gran escala provocan fenómenos de erosión, de contaminación y de pérdida de recursos del suelo, causando daños a infraestructuras y la pérdida de tierras de cultivo. Este tipo de catástrofes naturales se producen con mayor frecuencia en zonas de suelos erosionables, fuertes pendientes e intensas precipitaciones.

Dado que muchas de estas causas se dan simultáneamente en numerosos suelos, la consecución de una política en pro de la sostenibilidad del suelo exige la adopción de una estrategia integrada para su protección. No obstante, para la perspectiva del presente documento resulta de particular interés la contaminación del suelo y, en especial, la contaminación local o puntual.

La incorporación al suelo de agentes contaminantes por encima de su capacidad de amortiguación supone la contaminación del mismo y la posible contaminación de las aguas subterráneas, lo cual puede dar lugar a una limitación de algunas de las funciones de aquél (en particular, su uso).

La presencia en el suelo de elementos tóxicos para la salud humana y/o los ecosistemas supone un riesgo que, de ser inaceptable, exige la implantación de medidas correctoras acordes con las características del caso. La acumulación de sustancias tóxicas en el suelo tiene con frecuencia un origen antrópico, pero también puede ocurrir de manera natural.

CAPÍTULO 2

2.1. La protección del suelo en el ámbito internacional

2.2. La gestión de la contaminación del suelo en la Comunidad de Madrid

ANTECEDENTES

2.1. La protección del suelo en el ámbito internacional

Como ya se ha indicado, el suelo constituye un recurso de primer orden que ha de ser protegido puesto que supone el sostén de la actividad humana y de la vida en el planeta. La preocupación explícita por su degradación y conservación por parte de organismos internacionales se remonta a unos 30 años atrás.

La Carta Europea de los Suelos, aprobada por el Consejo de Europa en 1972, y la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano (1ª Conferencia del PNUMA, Estocolmo 1972) empiezan a poner de manifiesto la preocupación por la degradación y contaminación del suelo como consecuencia del desarrollo humano.

La Carta Mundial de los Suelos de la FAO (1981) y la Política Mundial del Suelo del PNUMA (1982) persiguen el fomento de la cooperación internacional para el uso racional del recurso suelo y reflejan la preocupación por su degradación. En ellas se establecen los principios de actuación para la explotación de los suelos de forma sostenible y las directrices para la formulación de políticas nacionales.

Por otro lado, la Cumbre de Río de Janeiro de 1992 ha marcado un hito histórico en cuanto al compromiso internacional en el ámbito de la protección del medio ambiente. En el marco de la misma se desarrolló el Convenio sobre la Diversidad Biológica, estableciendo un compromiso de conservación de la diversidad biológica y de la utilización sostenible de sus componentes (entre los que se encuentra el suelo) y de los recursos genéticos.

La importancia de los ecosistemas terrestres queda recogida en la Convención Marco sobre el Cambio Climático de 1992, en la que se reconoce su papel como sumideros de gases de efecto invernadero y se señala que la degradación del suelo y sus cambios de uso inciden negativamente en el aumento global de las emisiones de gases de efecto invernadero. En esa misma línea, el Protocolo de Kioto (1997) promueve el desarrollo sostenible e invita a todas las partes a aplicar políticas y medidas de protección y aumento de los sumideros de gases de efecto invernadero.

En cuanto a la problemáticas específicas de la erosión de los suelos y de la pérdida de suelo agrícola a nivel mundial, la Convención de Lucha contra la Desertificación y la Sequía (1994) marcó como objetivo prevenir y reducir la degradación del suelo, rehabilitar las zonas que están parcialmente degradadas y recuperar las que se hayan desertificado.

La conciencia de la comunidad internacional respecto a la necesidad de proteger el suelo es cada vez más evidente, como lo ponen de manifiesto las recientes iniciativas y compromisos políticos y legales para la protección de los recursos y del medio ambiente (Nairobi 1997, Malmö 2000, Johannesburgo 2002).

En el ámbito de la Unión Europea (UE), aunque muchas de sus políticas afectan al suelo y algunas de ellas velan por su protección (aún no siendo éste su objetivo principal), todavía no exis-

te legislación europea específica para la protección del mismo. A este respecto las políticas más importantes son, entre otras, las de medio ambiente, agricultura, desarrollo regional, transporte, investigación y desarrollo. Por su relevancia cabe mencionar las Comunicaciones de la Comisión COM (1998) 42, sobre una estrategia comunitaria en materia de biodiversidad, y COM (2002) 88, sobre políticas y medidas de la UE para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero: hacia un Programa Europeo sobre el Cambio Climático (PECC).

También cabe resaltar que el Sexto Programa de Acción Comunitario en Materia de Medio Ambiente (Decisión 1600/2002/CEE) incluye una estrategia temática para la protección del suelo, la cual hace especial hincapié en prevenir la contaminación, la erosión, la desertización, la degradación del suelo, la ocupación de terrenos y los riesgos hidrogeológicos.

La Comunicación de la Comisión Europea COM (2002) 179, "Hacia una estrategia temática para la protección del suelo", es la primera que aborda de forma específica esta cuestión. Trata, entre otros temas, de la erosión, la pérdida de materia orgánica del suelo y la prevención de la contaminación. Con objeto de garantizar su adecuada protección, la Comisión de la Unión Europea va a proponer a partir de 2002 una serie de medidas dirigidas a evitar la contaminación del suelo y procurará integrar la protección del suelo en las principales políticas de la UE. Por otra parte, la Comisión llevará a cabo los preparativos para una propuesta legislativa sobre la vigilancia del suelo.

2.2. La gestión de la contaminación del suelo en la Comunidad de Madrid

Ciñéndose a la problemática específica de la contaminación del suelo, la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, introduce en el ordenamiento jurídico español el concepto de suelo contaminado, atribuyendo a las Comunidades Autónomas la competencia para declarar, delimitar y hacer un inventario de suelos contaminados.

En el ámbito de la Comunidad de Madrid, la Consejería de Medio Ambiente y Desarrollo Regional elaboró en 1997 el Inventario de Suelos Potencialmente Contaminados de la Comunidad de Madrid, pretendiendo dotarse de un instrumento de uso interno que permitiese conocer el alcance de la problemática de dichos suelos. Este Inventario constituyó el documento base para desarrollar las necesidades derivadas de la Ley de Residuos.

Además, de conformidad con lo dispuesto en la Ley de Residuos, y en virtud de las competencias asumidas en el Estatuto de Autonomía de la Comunidad de Madrid, el Gobierno de la misma aprobó el Decreto 326/1999, de 18 de noviembre, que regula el régimen jurídico de los suelos contaminados en la Comunidad de Madrid, encomendando a la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio el ejercicio de las competencias en esta materia.

Entre otras cuestiones, este Decreto establece el procedimiento para la declaración de los suelos como contaminados y los efectos derivados de la misma, así como la creación del Inventario Regional de Suelos Contaminados con la categoría de registro público de carácter administrativo.

La actual política de la Comunidad de Madrid en materia de contaminación del suelo ha quedado plasmada en el Plan Regional de Actuaciones en materia de Suelos Contaminados de la Comunidad de Madrid (2001-2006), aprobado por el Consejo de Gobierno el 25 de octubre de 2001.

El Plan Regional establece que la política de suelos contaminados de la Comunidad de Madrid tiene dos objetivos principales: la protección de la salud humana y de los ecosistemas y la protección de los recursos (desarrollo sostenible).

El Plan Regional se apoya en los siguientes principios básicos de gestión de los suelos contaminados:

- La multifuncionalidad o protección del suelo de modo que pueda desempeñar todas sus posibles funciones y usos. Este principio se configura como global, si bien su aplicación será gradual y la consecución total del mismo sólo se conseguirá a largo plazo.
- La funcionalidad o protección del suelo de modo que pueda desempeñar las funciones correspondientes a su uso actual o previsto en el futuro. Este principio se configura como particular de cada caso, considerándose viable su aplicación a corto y medio plazo.
- La concienciación, formación e información pública.

Los principales objetivos del Plan Regional son los siguientes:

- El establecimiento y aplicación de una política preventiva basada en el criterio de multifuncionalidad y plasmada en el fomento de mejoras orientadas a la prevención de la contaminación del suelo.
- El establecimiento y aplicación de una política correctiva basada en el criterio de funcionalidad a corto y medio plazo y en el de multifuncionalidad a largo plazo. La acción correctiva se dirigirá tanto hacia los casos heredados del pasado como hacia los nuevos que inevitablemente surjan.
- La propuesta y desarrollo de los instrumentos legales, administrativos y económicos que permitan la puesta en práctica del Plan.
- El desarrollo del marco técnico necesario para la puesta en práctica del Plan.
- La sensibilización y concienciación social sobre la problemática de los suelos contaminados y su resolución.

Además de las medidas preventivas contempladas en el propio Plan Regional (obligación de informar en la transmisión de terrenos que han soportado actividades potencialmente contaminantes del suelo, obligación de llevar a cabo un control periódico de la calidad del suelo en los terrenos ocupados por dichas actividades, etc.), la aplicación de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación, supone la puesta en práctica de mecanismos adicionales preventivos de la contaminación del suelo. Así, dicha Ley permite, entre otras cuestiones, establecer para las instalaciones objeto de la misma valores límite de emisión de ciertas sustancias contaminantes, fijar prescripciones que garanticen la protección del suelo y de las aguas subterráneas y acreditar la calidad del suelo previa a la concesión de la Autorización Ambiental Integrada (AAI).

Por su parte, la aplicación de la Ley 2/2002, de 19 de junio, de Evaluación Ambiental de la Comunidad de Madrid, también está permitiendo ejercer una acción preventiva en los terrenos sometidos al procedimiento de Análisis Ambiental (en especial, el análisis del planeamiento urbanístico general, incluidas sus revisiones y modificaciones). Dicha acción se plasma en la inclusión de informes de caracterización del suelo en los Estudios de Incidencia Ambiental con la doble finalidad de identificar indicios de contaminación del mismo y establecer el denominado *Blanco Ambiental de la Situación Preoperacional*.

Por último, la Ley 5/2003, de 20 de marzo, de Residuos de la Comunidad de Madrid incluye varias determinaciones sobre los suelos contaminados, a los cuales dedica su Título VII. Dichas determinaciones se refieren a diversos aspectos de la Declaración de un suelo como contaminado, las operaciones de descontaminación, los informes de situación de las fincas en las que se haya realizado alguna actividad potencialmente contaminante del suelo, la tramitación de planes urbanísticos, la ejecución de desarrollos urbanísticos y la formalización de acuerdos voluntarios y convenios de colaboración para realizar operaciones de recuperación de suelos contaminados.

PROCESO DE GESTIÓN DE LOS SUELOS CONTAMINADOS EN LA COMUNIDAD DE MADRID

Teniendo en cuenta los objetivos del Plan Regional y la experiencia acumulada en los últimos años, la gestión de los suelos que pueden albergar algún problema de contaminación en la Comunidad de Madrid se está abordando de acuerdo con un proceso que consta de varias etapas.

La estructuración del proceso de gestión en etapas pretende, por una parte, optimizar los recursos asignados a la obtención de los datos que soportan las decisiones en cada caso y, por otra parte, flexibilizar el proceso para adaptarlo a la variada casuística que obliga a investigar y diagnosticar la contaminación del suelo. De este modo, los resultados de cada una de las etapas determinan la necesidad o no de pasar a la siguiente y, en caso necesario, la orientación de los trabajos a realizar. En cualquier caso, las decisiones deben estar justificadas técnica, económica y ambientalmente a lo largo de todo el proceso.

El esquema adjunto sintetiza la secuencia que, en un caso genérico, sigue la gestión de un suelo en el que existen posibilidades de contaminación.

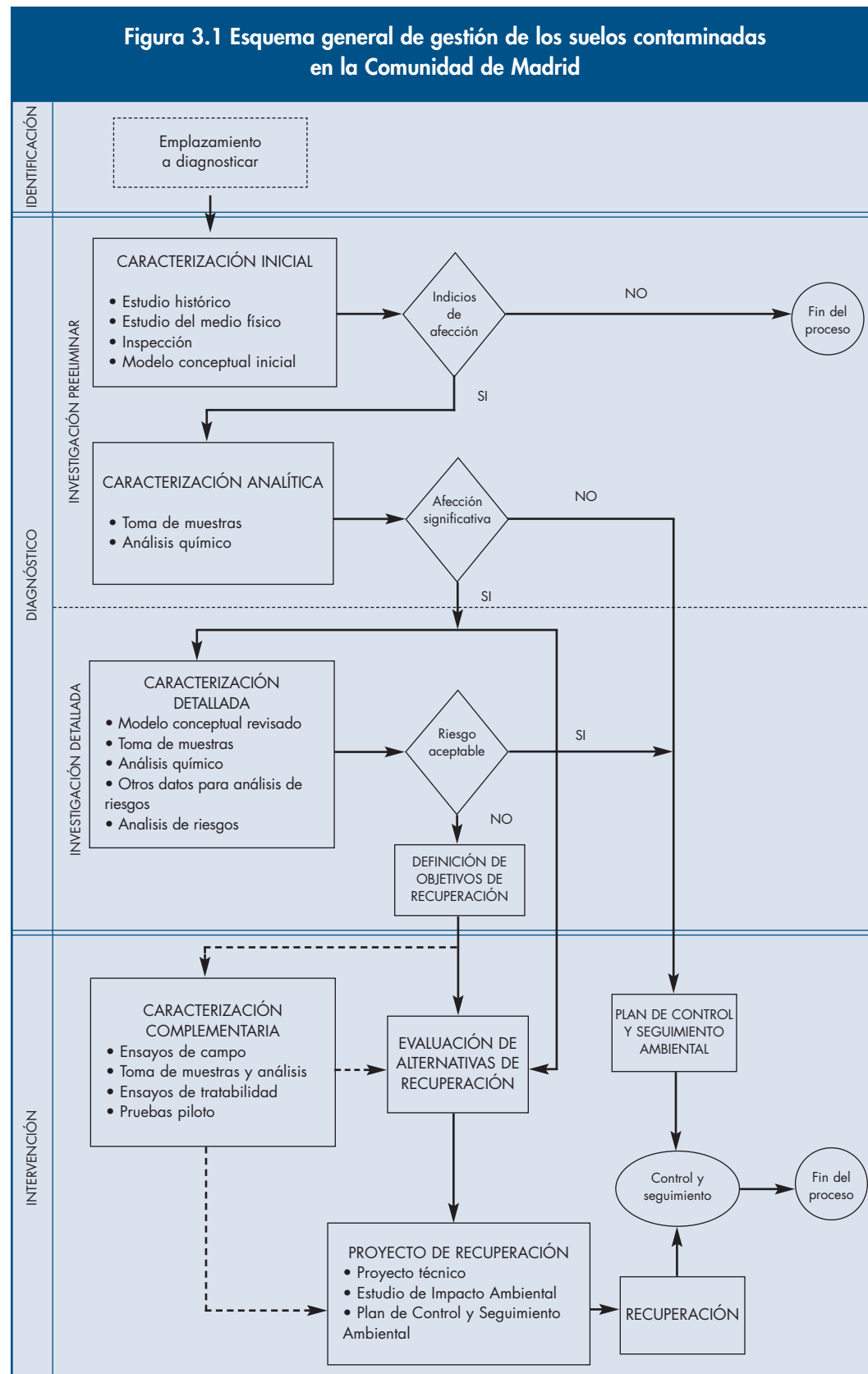
El conjunto del proceso consta de tres grandes etapas:

- **Identificación:** en esta etapa se incluyen todos los trabajos que dan lugar a la identificación de un emplazamiento como merecedor de ser diagnosticado en lo relativo a la presencia de contaminación en su suelo.
- **Diagnóstico:** esta etapa se inicia cuando se toma la decisión de analizar la problemática de un emplazamiento previamente identificado. En ella se pretende obtener los datos necesarios para decidir si es o no preciso llevar a cabo alguna actuación en el emplazamiento y, en caso afirmativo, el tipo de actuación.
- **Intervención:** esta etapa se inicia cuando, a la vista de los resultados del diagnóstico, se concluye que es necesario poner en práctica actuaciones de recuperación y/o control y seguimiento de un emplazamiento. En ella se procede, en primer lugar, a definir en detalle las actuaciones y seguidamente a ponerlas en práctica.

A continuación se describen las principales tareas a ejecutar en cada una de las etapas antes mencionadas y los criterios a aplicar para la toma de decisiones.

La casuística que puede dar lugar al inicio del proceso de gestión de un emplazamiento por razones de una posible contaminación de su suelo es diversa. Desde el punto de vista de las posibilidades de intervención del Órgano Ambiental de la Comunidad de Madrid (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio), cabe diferenciar dos tipos de situaciones:

- Emplazamientos o terrenos en los que existe una intervención de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio al hilo de alguno de los procedimientos contemplados en la legislación vigente. En la actualidad, los emplazamientos encuadrados en esta categoría son los siguientes:



- Emplazamientos incluidos en el Inventario de Suelos Potencialmente Contaminados de la Comunidad de Madrid.

- Emplazamientos que han soportado en el pasado y/o soportan en el presente actividades potencialmente contaminantes del suelo, de acuerdo con el desarrollo reglamentario de la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos.

- Emplazamientos que soportan o van a soportar actividades sometidas al procedimiento de concesión de Autorización Ambiental Integrada (AAI), en cumplimiento de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.

- Emplazamientos afectados por accidentes en los que se ha podido producir una contaminación del suelo.

- Emplazamientos afectados por denuncias en los que exista sospecha de que se ha podido producir una contaminación del suelo.

- Terrenos sometidos al procedimiento de Análisis Ambiental, en cumplimiento de lo dispuesto en la Ley 2/2002, de 19 de junio, de Evaluación Ambiental de la Comunidad de Madrid. Dentro de este grupo, cabe destacar el análisis del planeamiento urbanístico general, incluidas sus revisiones y modificaciones.

- Emplazamientos en los que, aún no teniendo por qué existir una intervención de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, ésta puede hacerlo a petición de terceros (por ejemplo, en el marco de operaciones de transferencia de propiedad).

Independientemente de la casuística que justifique la conveniencia de llevar a cabo el diagnóstico de un emplazamiento, el desarrollo del mismo se aborda en dos fases: las denominadas Investigación Preliminar e Investigación Detallada.

La Investigación Preliminar se inicia con un conjunto de tareas agrupadas bajo la denominación de Caracterización Inicial. Esencialmente, dichas tareas son el estudio histórico del emplazamiento, el estudio básico del medio físico en el que se encuentra y la inspección del emplazamiento. La información recopilada durante estas labores debe dar lugar a la elaboración del modelo conceptual inicial, en el que se reflejan las primeras hipótesis acerca de la problemática del emplazamiento, estructuradas desde una perspectiva de análisis de riesgos, es decir, incidiendo en las causas y focos de contaminación del suelo, los contaminantes significativos, los mecanismos de migración de los mismos y los receptores que pueden estar razonablemente expuestos a la contaminación a través de una o más vías.

La formulación del 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. No obstante, la ausencia de indicios de afección en terrenos sometidos al procedimiento de Análisis Ambiental del planeamiento urbanístico general no exime de llevar a cabo en los mismos una caracterización analítica durante la tramitación de los instrumentos de planeamiento de desarrollo, con el fin de establecer el denominado *Blanco Ambiental de la Situación Preoperacional*. Lo mismo cabe decir para aquellos emplazamientos que soportan o van a soportar actividades sometidas al procedimiento de concesión de AAI, cuyos estudios de calidad del suelo deben incluir siempre la caracterización analítica del mismo.

En los casos que lo requieran, una vez finalizada la Caracterización Inicial, se acometerán las tareas encuadradas en la denominada Caracterización Analítica. El objeto de la misma es 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. No obstante, es posible que, en determinadas circunstancias, no se requiera adoptar medidas de control y seguimiento ambiental, en cuyo caso se dará por finalizado el proceso.

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.

Cuando se decida acometer una Investigación Detallada del emplazamiento, ésta se iniciará con las tareas encuadradas en la denominada Caracterización Detallada, la primera de las cuales consiste en revisar el modelo conceptual inicial a la luz de todos los datos obtenidos durante la Investigación Preliminar. El modelo conceptual revisado debe constituir la base sobre la que diseñar el resto de los trabajos de esta fase: la toma de muestras de los medios afectados, su análisis químico 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 etapa de diagnóstico.

La definición detallada de las medidas de recuperación 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, se acometerá una Caracterización Complementaria, la cual 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.

Por otra parte, de acuerdo con la Ley 2/2002, de 19 de junio, de Evaluación Ambiental de la Comunidad de Madrid, los proyectos de descontaminación de suelos se encuadran en las actividades a estudiar caso por caso por el órgano ambiental de la Comunidad de Madrid de cara a decidir si deben o no someterse a un procedimiento ambiental. Cuando se decida que sí deben someterse, el Proyecto de Recuperación incluirá, además del Proyecto Técnico, el preceptivo Estudio de Impacto Ambiental o Memoria Ambiental, en función de que el procedimiento aplicable sea el de Evaluación de Impacto Ambiental o el de Evaluación Ambiental de Actividades, respectivamente.

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.

En todo caso, 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.

El Plan Regional de Actuaciones en materia de Suelos Contaminados de la Comunidad de Madrid (2001-2006) incluye un Programa de Desarrollo del Marco Técnico de Gestión de los Suelos Contaminados, cuya finalidad es elaborar una serie de estudios que permitan establecer una base técnica homogénea para la correcta gestión de aquéllos en la Comunidad de Madrid.

Dentro de dicho Programa se prevé desarrollar, entre otras, varias guías temáticas que aborden aspectos de especial interés para la evaluación y corrección de la contaminación del suelo. Tras la publicación del documento "Determinación de niveles de fondo y niveles de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid" (IGME, 2002), se ha abordado el desarrollo de tres guías orientadas a los siguientes aspectos:

- La investigación de la contaminación del suelo.
- El análisis de riesgos para la salud humana y los ecosistemas derivados de la contaminación del suelo.
- Las tecnologías de recuperación de los suelos contaminados.

Un conocimiento adecuado de la calidad del suelo de cada emplazamiento es de suma importancia para establecer la gestión del suelo contaminado de una manera eficaz. Además, teniendo en cuenta el proceso global de gestión planteado en la Comunidad de Madrid, se hace patente el nexo existente entre la investigación de la calidad de los suelos, la evaluación de los riesgos y la selección de la actuación más adecuada.

La Guía de Investigación de la Calidad del Suelo pretende ser una referencia y servir de ayuda en el momento de acometer tareas de reconocimiento de la calidad de los suelos en emplazamientos situados en la Comunidad de Madrid, tanto en aquellos casos sospechosos de presentar contaminación debido a la presencia de actividades que hayan podido introducir compuestos químicos por encima de los valores naturales del suelo, como en aquellos casos en los que se requiera un conocimiento de la calidad de los suelos previo a la implantación de una actividad industrial.

Los objetivos particulares de la guía son los siguientes:

- Definir un marco global de las tareas necesarias para acometer las labores de investigación de suelos en emplazamientos situados en la Comunidad de Madrid.
- Servir de referencia en el momento de decidir el enfoque ante un problema de contaminación de suelos.
- Identificar los elementos necesarios para obtener la información requerida para las etapas posteriores de la gestión de los suelos contaminados:
 - a) análisis de riesgos para la salud humana y los ecosistemas.
 - b) establecimiento de las medidas necesarias a adoptar para la reducción de dichos riesgos hasta niveles aceptables.
- Contribuir a la concienciación pública sobre la problemática de los suelos contaminados y su resolución.

De cara a facilitar la comprensión y utilización de la presente guía, a continuación se exponen las definiciones adoptadas para algunos términos que aparecen en la misma.

Acuífero: Formación o cuerpo geológico permeable capaz de almacenar y transmitir agua en cantidades aprovechables.

Acuífero libre: Acuífero en el que el límite superior de la zona saturada se encuentra a presión atmosférica.

Acuífero confinado: Acuífero separado de la superficie por una formación geológica de baja permeabilidad y en el que la zona saturada se encuentra sometida a presiones superiores a la atmosférica.

Acuitardo: Formación geológica que almacena cantidades apreciables de agua pero que las transmite muy lentamente.

Adsorción: Fenómeno físico por el que un compuesto presente en fase líquida o gaseosa queda retenido en la superficie de las partículas sólidas del suelo.

Afección: Cualquier alteración de la calidad natural del suelo originada por acciones antrópicas.

Afección significativa: Afección de la calidad del suelo consistente en la presencia de uno o más contaminantes en concentraciones superiores a los respectivos criterios orientativos de la calidad del suelo (COCS).

Aguas subterráneas: Todas aquellas aguas presentes en los intersticios o huecos bajo la superficie del terreno, a una presión igual o superior a la atmosférica.

Aguas superficiales: Todas aquellas aguas continentales que, independientemente de su origen, discurren o se localizan sobre la superficie terrestre.

Aire: Medio compuesto por la fracción gaseosa de la Tierra no incluida en el suelo ni en las aguas. En términos prácticos, puede asimilarse al conjunto del aire ambiente(1) y al aire interior de los edificios.

Aire intersticial del suelo: Fase gaseosa que se encuentra ocupando parte de los poros del suelo de la zona no saturada. En zonas no afectadas por la contaminación, está generalmente constituido por una mezcla de gases atmosféricos tales como el oxígeno y nitrógeno y otros, como el dióxido de carbono, producidos por actividades metabólicas de los organismos del suelo.

Análisis de riesgos: Proceso de evaluación de la contaminación del suelo cuyo objetivo es determinar el riesgo que la misma supone para los objetos a proteger (poblaciones humanas, ecosistemas u otros recursos), de acuerdo con las características específicas del caso.

Atenuación: Reducción de la concentración de un contaminante en el medio a través de procesos biológicos, químicos y físicos.

Autorización Ambiental Integrada: Resolución del órgano competente en materia de medio ambiente por la que se permite, a los solos efectos de la protección del medio ambiente y de la salud de las personas, explotar la totalidad o parte de una instalación, bajo determinadas condiciones destinadas a garantizar que la misma cumple el objeto y las disposiciones de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.

Biodegradación: Proceso de transformación de un compuesto químico por la acción de microorganismos o plantas.

Blanco Ambiental de la Situación Preoperacional: Conjunto de parámetros medibles que definen la calidad previa del suelo en el ámbito territorial donde se quiere desarrollar un proyecto o implantar una actividad.

Calidad del suelo: Conjunto de propiedades del suelo relativas a sus procesos internos y a su estabilidad o fragilidad frente a agentes de degradación o contaminación que condicionan su uso.

Capacidad de intercambio iónico: En edafología, expresa los moles de iones adsorbidos por kilogramo de suelo seco que pueden ser intercambiados con la solución circundante, bajo unas condiciones dadas de temperatura, presión, composición de la fase líquida y una relación de masa-solución dada. Esta magnitud varía según el tipo de suelo, dependiendo del contenido y tipo de minerales de arcilla y compuestos orgánicos (2).

Caracterización: Todo trabajo orientado a la obtención de datos relevantes para establecer el diagnóstico de la contaminación del suelo de un emplazamiento.

Coefficiente de almacenamiento: Volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero de sección igual a la unidad y altura igual a la del acuífero saturado si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico.

Conductividad hidráulica: En hidrogeología, coeficiente que define el caudal de agua que atraviesa una sección unitaria del acuífero bajo un gradiente hidráulico unitario a una temperatura dada.

Contaminación del suelo: Introducción de contaminantes en el suelo por encima de los niveles que producen consecuencias negativas en la salud humana, los ecosistemas o los recursos naturales.

Contaminante: Materia o sustancia, sus combinaciones o compuestos, derivados químicos o biológicos que al incorporarse y actuar en el suelo alteran o modifican negativamente sus características, comportando un riesgo para la salud humana, los ecosistemas o los recursos naturales.

Control y seguimiento ambiental: Conjunto de actuaciones que tienen por objeto controlar los elementos determinantes de los riesgos derivados de la contaminación del suelo, sin ejercer ninguna acción correctora directa sobre los mismos.

Criterios Orientativos de la Calidad del Suelo (COCS): Niveles de referencia aplicables en la Comunidad de Madrid para evaluar de forma genérica la contaminación del suelo.

Descarga: Volumen de agua que sale de un acuífero por medios naturales durante un período de tiempo determinado.

Descontaminación: Actuación de recuperación orientada a disminuir las concentraciones de los contaminantes implicados hasta niveles acordes con los COCS.

Diagnóstico de la contaminación del suelo: Proceso de evaluación de la contaminación del suelo de un emplazamiento tendente a establecer el alcance de la misma y a evaluar los riesgos que comporta para la salud humana y/o los ecosistemas.

Ecosistema: Cualquier unidad natural que incluya todos los organismos que conviven en un área determinada, los cuales interactúan con el medio abiótico que les rodea, creando un flujo de energía e información así como un ciclo de materia.

Emplazamiento: Ámbito territorial en el que se ubica uno o varios focos de contaminación del suelo. Por extensión, también se puede considerar como el ámbito territorial en el que se ha constatado la presencia de contaminación del suelo debida a una determinada causa o actividad.

Fase libre o Fase líquida no acuosa (NAPL): Líquido inmisible en agua que en procesos de contaminación de aguas subterráneas constituye una capa diferenciada del agua.

Fase líquida no acuosa ligera (LNAPL): Líquido inmisible en agua de menor densidad que ella y que, por tanto, en procesos de contaminación de aguas subterráneas se presenta flotando sobre el nivel freático.

Fase líquida no acuosa pesada (DNAPL): Líquido inmisible en agua de mayor densidad que ella y que, por tanto, en procesos de contaminación de aguas subterráneas tiende a hundirse en la zona saturada y a acumularse en la base del acuífero.

Foco: Causa original de la contaminación presente en uno o varios medios.

Franja capilar: Zona situada inmediatamente por encima del nivel freático en la cual el agua es atraída por fuerzas capilares.

Fuente de la afección/contaminación: Ámbito físico en el que se localizan concentraciones de contaminantes en el suelo susceptibles de afectar a otras zonas por su movilización.

Fuerzas capilares: Causas de retención del agua en los capilares del suelo, como consecuencia de la tendencia de las moléculas del agua a adherirse a los sólidos y la atracción entre moléculas de fluidos no miscibles.

Gradiente hidráulico: Diferencia entre el potencial hidráulico de dos puntos separados una distancia unitaria.

Intervención: Etapa del proceso de gestión de un emplazamiento en la que, partiendo del diagnóstico de la contaminación del suelo, se definen y ponen en práctica las actuaciones oportunas de recuperación y/o control y seguimiento.

Investigación de la contaminación del suelo: Conjunto de tareas de caracterización y evaluación de datos sobre la contaminación del suelo de un emplazamiento que permiten establecer el diagnóstico de la misma.

Lixiviación: Proceso de movilización de contaminantes debido al arrastre de los mismos por el agua que circula a través de un medio contaminado.

Medidas correctoras: Conjunto de actividades desarrolladas con el objetivo de atenuar un efecto adverso derivado de la contaminación del suelo.

Medio: Cada uno de los sistemas naturales que conforman el medio ambiente: suelo, agua subterránea, agua superficial, aire y biota, incluyendo las relaciones que existen entre ellos (3).

Migración o movilización: Conjunto de procesos que afectan a los contaminantes desde que son liberados en el foco hasta que entran en contacto con los receptores. Incluye los procesos de transporte, transferencia y transformación.

Modelo conceptual: Esquema descriptivo de las condiciones de un emplazamiento en términos de los elementos de la cadena de riesgo: focos y distribución de los contaminantes, mecanismos de emisión y movilización, vías de exposición y receptores potenciales existentes.

Multifuncionalidad: Principio que persigue la protección y conservación de todas las funciones posibles del suelo. De acuerdo con él, la forma en que se utiliza el suelo en el presente no debe afectar a su capacidad para soportar en el futuro todo tipo de usos potenciales acordes con las características naturales del suelo (4).

Nivel de fondo: Concentración de sustancias presentes de forma sistemática en un suelo que

no se debe a actividades humanas localizadas sino exclusivamente a las propias características naturales del mismo.

Nivel freático: Límite superior de la zona saturada en el que el agua se encuentra a presión atmosférica.

Nivel piezométrico: Altura de la columna de agua en un punto de un acuífero que equilibra la presión del agua subterránea con la presión atmosférica.

Objetivos de recuperación: Directrices establecidas para una actuación de recuperación de un suelo contaminado consistentes, en general, en combinar medidas de reducción de las concentraciones de contaminantes en los medios afectados y medidas de reducción de la exposición de los receptores a dichos contaminantes.

Permeabilidad: Capacidad de un medio para permitir el flujo de fluidos a su través.

Piezómetro: Pozo, en general de pequeño diámetro, construido con el fin de medir los niveles piezométricos o llevar a cabo el control y seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas.

Pluma de contaminación: Referido a aguas subterráneas, ámbito de un acuífero afectado por un fenómeno de contaminación en un momento dado.

Población: Conjunto de individuos de una misma especie que comparten un mismo ámbito territorial.

Porosidad: Relación, expresada en porcentaje, entre el volumen de un cuerpo ocupado por espacios vacíos y el volumen total de dicho cuerpo.

Porosidad eficaz: En hidrogeología, relación, expresada en porcentaje, entre el volumen del suelo ocupado por espacios vacíos interconectados y el volumen total de dicho suelo.

Pozo de control: Perforación realizada en un acuífero y equipada con el fin de medir periódicamente determinados parámetros del mismo. Habitualmente también se destina a tomar muestras de agua subterránea para determinaciones analíticas.

Recarga: Volumen de agua que, por medios naturales o artificiales, entra en un acuífero durante un período de tiempo determinado.

Receptor: Individuo representativo de un grupo de población humana o de otra especie, expuesto a la contaminación procedente del foco a través de una o más vías de exposición.

Recuperación: Conjunto de actuaciones correctoras que tienen por objeto reducir hasta niveles aceptables los riesgos derivados de la contaminación del suelo.

Riesgo: Probabilidad de que un contaminante presente en el suelo entre en contacto con un receptor y produzca efectos adversos en la salud de las personas o el medio ambiente.

Saneamiento: Actuación de recuperación orientada a disminuir las concentraciones de los contaminantes implicados hasta niveles acordes con los objetivos derivados del análisis de riesgos.

Solubilidad: Capacidad de una sustancia de disolverse en un líquido.

Sondeo: Perforación realizada en el terreno con el objeto de estudiar las características del suelo.

Sondeo ligero o semimecánico: Perforación realizada en el terreno por medio de herramientas de tipo portátil requiriendo, generalmente, suministro de energía eléctrica.

Sondeo manual: Perforación realizada en el terreno por medio de herramientas de tipo manual, sin que sea necesario el suministro de energía eléctrica.

Sondeo mecánico: Perforación realizada en el terreno por medio de maquinaria pesada.

Suelo: Parte sólida de la corteza terrestre, desde la roca madre hasta la superficie, que incluye tanto su fase líquida y gaseosa como los organismos que en él habitan, y que

soportan el fenómeno vital de la biosfera y, en particular, la vida de la especie humana.

Suelo contaminado: Todo aquél cuyas características físicas, químicas o biológicas han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes de carácter peligroso de origen humano, en concentración tal que comporte un riesgo para la salud humana o el medio ambiente, de acuerdo con los criterios y estándares que se determinen reglamentariamente y así se haya declarado mediante resolución expresa (5).

En tanto no se desarrollen reglamentariamente los criterios y estándares antes mencionados, se considera como tal todo emplazamiento que reúna todas y cada una de las siguientes condiciones (6):

a) Haberse producido o producirse, de forma voluntaria o involuntaria, vertidos, filtraciones o incorporaciones al suelo de residuos, sustancias derivadas de los mismos, materias primas o productos, cualquiera que sea su estado físico.

b) Haberse producido o producirse una movilización de contaminantes a las aguas continentales, al suelo o a la atmósfera, que alteren sustancialmente las características físico-químicas de fondo existentes en el entorno natural del emplazamiento.

c) Conllevar un riesgo grave para la salud humana o el medio ambiente.

Transmisividad: Caudal que se transmite a través del terreno de ancho unidad y de altura igual al espesor saturado bajo un gradiente unidad a una temperatura determinada.

Unidad Tipo: Grupo de suelos de la Comunidad de Madrid homogéneo desde el punto de vista litológico, geoquímico y edafológico (7).

Vía de exposición: Mecanismo de entrada o incorporación de un contaminante al receptor. Las vías de exposición genéricas son ingestión, contacto dérmico e inhalación.

Zona no saturada: Parte del suelo situada por encima de la superficie freática en la que los huecos se encuentran ocupados por líquidos (normalmente agua) o gases (normalmente aire) a presión atmosférica.

Fuentes:

- (1) Directiva 96/62/CE, del Consejo, de 27 de septiembre de 1996, sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente. DOCE L/296, de 21 de noviembre de 1996.
- (2) Porta et al. 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi-Prensa, Madrid.
- (3) Directiva 91/414/CEE, del Consejo, de 15 de julio de 1991, relativa a la comercialización de productos fitosanitarios. DOCE L/230, de 19 de agosto de 1991. P. 001-0032
- (4) Acuerdo de 25 de octubre de 2001, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Plan Regional de Actuación en materia de Suelos Contaminados de la Comunidad de Madrid. BOCM N° 283, 28 de noviembre.
- (5) Ley 5/2003, de 26 de marzo, de residuos de la Comunidad de Madrid. BOCM N° 76, 31 de marzo.
- (6) Decreto 326/1999, de 18 de noviembre, por el que se regula el régimen jurídico de los suelos contaminados de la Comunidad de Madrid. BOCM N° 280, 25 de noviembre.
- (7) 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 de Madrid. IGME, Madrid.

CAPÍTULO 6

6.1. Introducción

6.2. Objetivos

6.3. Proceso de la Investigación Preliminar de la calidad del suelo

6.4. Caracterización inicial

6.4.1. Definición de los objetivos a alcanzar

6.4.2. Estudio histórico del emplazamiento y su entorno

6.4.3. Estudio del medio físico

6.4.4. Desarrollo del modelo conceptual inicial del emplazamiento

6.4.5. Conclusiones del estudio de Caracterización Inicial

6.5. Caracterización Analítica

6.5.1. Definición de la estrategia de obtención de datos

6.5.2. Programa de muestreo y análisis del suelo

6.5.3. Conclusiones para trabajos posteriores

FASE 1: INVESTIGACIÓN PRELIMINAR DE LA CALIDAD DEL SUELO

6.1. Introducción

El proceso de *Investigación Preliminar* del suelo constituye la primera etapa para el diagnóstico de la situación de un emplazamiento determinado en cuanto a la calidad del suelo se refiere. Esta fase se pone en marcha como consecuencia tanto de una posible contaminación del suelo como en aquellos casos en los que exista un procedimiento administrativo que así lo determine (por ejemplo, el establecimiento del *Blanco Ambiental de la Situación Preoperacional* u otros terrenos sometidos a procedimiento de Análisis Ambiental).

La *Investigación Preliminar* incluye las labores necesarias para obtener y evaluar datos que permitan describir la calidad del medio, así como los principales procesos que van a controlar el transporte de contaminantes en el mismo. La información obtenida servirá para abordar etapas posteriores, por lo que deberán tenerse en cuenta criterios de carácter general en su desarrollo.

6.2. Objetivos

El objetivo de la *Investigación Preliminar* es definir si el emplazamiento en estudio presenta o no indicios de afección en el suelo y, en caso afirmativo, de qué magnitud, con el fin de poder establecer las etapas siguientes a adoptar en la gestión del emplazamiento.

Como consecuencia de este objetivo general se obtendrán, además, los siguientes objetivos parciales, a los que debe ir enfocada la estrategia del proceso de investigación:

- Caracterización básica del medio físico del emplazamiento. Identificación de los aspectos geológicos e hidrogeológicos más relevantes y climatología característica, que van a condicionar la distribución de la contaminación.
- Caracterización básica de los usos del suelo y actividades desarrolladas históricamente. Identificación de los principales receptores potenciales en el ámbito de estudio y su entorno inmediato.
- Caracterización básica de la contaminación presente. Identificación de principales contaminantes en el emplazamiento, focos existentes o potenciales, medio afectado, distribución de la contaminación, principales vías de movilización y posibles vías de exposición a la contaminación por parte de los receptores potenciales.

6.3. Proceso de la Investigación Preliminar de la calidad del suelo

La *Investigación Preliminar* se desarrolla siguiendo un procedimiento secuencial en el que se distinguen dos fases:

1. Caracterización Inicial: engloba todas las labores de recopilación de información básica del emplazamiento que servirán para determinar si existen indicios fundados de afectación al medio.
2. Caracterización Analítica: en la que se llevará a cabo la toma de muestras, análisis e interpretación de los resultados obtenidos, para la definición de la calidad del medio.

Durante el proceso, la información obtenida servirá para la elaboración de un modelo conceptual inicial del emplazamiento; se definirá una hipótesis de comportamiento del sistema, basándose en el cual se diseñará el programa de muestreo y análisis. Los resultados que se obtengan de la toma de datos en campo servirán para definir de nuevo la hipótesis inicial y determinar las siguientes etapas a adoptar.

El modelo conceptual en esta fase de investigación puede describirse como una “fotografía” inicial de las condiciones del emplazamiento, que ilustra la distribución de los contaminantes, los mecanismos de vertido y movilización en el medio, las vías de exposición y los potenciales receptores. El estudio debe estructurarse desde el inicio bajo una perspectiva de análisis de riesgos.

En el cuadro 6.1 se indican las etapas del proceso de Investigación Preliminar de la calidad del suelo y que se desarrollan a continuación.

Cuadro 6.1	
Investigación Preliminar de la Calidad del Suelo. Síntesis de tareas	Ver apartado
CARACTERIZACIÓN INICIAL:	
I. Definición de los objetivos a alcanzar • Definir los objetivos que se pretenden alcanzar teniendo en cuenta los hechos que han motivado la investigación (Denuncia, Inventario de suelos potencialmente contaminados, etc.).	6.4.1.
II. Estudio histórico • Contexto geográfico (localización de instalaciones en el contexto local). • Estudio histórico del emplazamiento y entorno inmediato: - Evolución histórica de los usos del suelo en el emplazamiento y su entorno (fotografías aéreas, cartografía histórica, etc.). - Usos actuales del suelo en el entorno (actividades desarrolladas, industria, presencia de zonas de especial interés ambiental, etc.). - Uso actual del suelo del emplazamiento: descripción de la actividad industrial o actividad existente (identificación de los elementos potencialmente contaminantes del emplazamiento). - Estudio de antecedentes ambientales o episodios contaminantes: vertidos, accidentes, etc.	6.4.2.
III. Estudio del medio físico • Definición de las características del medio físico más relevantes (contexto geológico e hidrogeológico del emplazamiento y entorno, climatología, topografía, inventario de puntos de agua).	6.4.3.
IV. Desarrollo del modelo conceptual inicial del emplazamiento • Organización de la información obtenida en las fases anteriores: - Identificación de fuentes potenciales de contaminación. - Identificación de las características del medio físico. - Identificación de posibles vías de movilización, exposición y receptores. • Reconocimiento del emplazamiento. Visita e inspección al emplazamiento. • Elaboración de un modelo conceptual inicial.	6.4.4.
V. Conclusiones del estudio • Elaboración de un informe conclusivo en el que quede definido si existen o no indicios de afectación en el emplazamiento.	6.4.5.
CARACTERIZACIÓN ANALÍTICA:	
I. Definición de la estrategia de obtención de datos necesarios • Diseño del programa de muestreo y análisis de suelos y otros medios de interés (aguas subterráneas, aguas superficiales) para determinar la calidad del suelo del emplazamiento.	6.5.1

Cuadro 6.1 (continuación)	
Investigación Preliminar de la Calidad del Suelo. Síntesis de tareas	Ver apartado
II. Programa de muestreo y análisis • Programa de muestreo. Distribución, localización y número de puntos de muestreo. • Programa analítico. Identificación de potenciales contaminantes, Criterios Orientativos de la Calidad del Suelo (COCS) para los contaminantes y medios seleccionados, definición de técnicas y métodos analíticos a emplear. Plan de Calidad. • Selección de técnicas de muestreo y análisis. • Definición de las medidas de seguridad e higiene necesarias para los trabajos de campo.	6.5.2
III. Conclusiones • Definición de la existencia o no de afectación significativa en el suelo del emplazamiento. • Elaboración de informe conclusivo en el que se reflejen las siguientes etapas a acometer en función de cada caso.	6.5.3

6.4. Caracterización inicial

6.4.1. Definición de los objetivos a alcanzar

La caracterización inicial, tal y como ha quedado reflejado en la figura 1, tiene por objeto la recopilación de la información necesaria para concluir si existen o no indicios de afectación en el emplazamiento estudiado, de manera que puedan obtenerse los criterios necesarios para abordar las siguientes etapas en el proceso de gestión de los suelos contaminados en la Comunidad de Madrid.

En cualquier situación es preciso definir en primer lugar los hechos que han conducido a la necesidad de llevar a cabo dicha caracterización inicial, puesto que van a influir de manera decisiva a la hora de abordar las etapas posteriores.

6.4.2. Estudio histórico del emplazamiento y su entorno

La caracterización inicial se pone en marcha con la recopilación de la información relativa a la actividad histórica desarrollada en la zona, la cual incluye tanto la localización del emplazamiento en su contexto regional y local, como el estudio de la evolución de los usos de los suelos del propio emplazamiento y entorno, así como la descripción de los usos actuales en el mismo.

Esta información se considera fundamental para decidir si se cuenta o no con indicios de afectación en el emplazamiento. Se valorará en cada caso el alcance de dicho estudio, teniendo en cuenta los objetivos finales de la caracterización inicial y los hechos que han conducido a la realización de la investigación del emplazamiento.

El estudio histórico debe permitir, por tanto, la identificación de posibles fuentes de contaminación, sus características, su potencial afectación al medio y otros aspectos de interés para la elaboración del modelo conceptual inicial del emplazamiento.

Contexto geográfico

Incluirá la información relativa a la localización del emplazamiento en estudio a una escala adecuada por medio de mapas topográficos, indicándose en los mismos la localización exacta de la instalación o de la zona de estudio y todos aquellos aspectos que puedan ser relevantes (localización de infraestructuras, presencia de elementos de interés, etc.).

Además de consultarse fuentes cartográficas, deben aportarse mapas de creación propia que faciliten la localización del emplazamiento y su ubicación en el contexto geográfico regional y local.

Estudio histórico del emplazamiento y su entorno

Se efectuará un estudio de la evolución de los usos de la zona a partir de fuentes bibliográficas u otro tipo de consultas que se consideren oportunas (organismos oficiales, entrevistas, etc.). Este estudio se desarrollará teniendo en cuenta la casuística específica del emplazamiento, adaptándose a las necesidades de cada caso particular.

Los aspectos más relevantes de la información a obtener recaen en las actividades potencialmente contaminantes desarrolladas en el emplazamiento y su entorno y, por tanto, en los productos químicos implicados tanto en el pasado como en el presente.

Entre los aspectos más destacados a considerar se encuentran: los usos históricos, los procesos productivos que hayan podido desarrollarse en el emplazamiento, las materias primas utilizadas, los residuos generados (tanto residuos no peligrosos como residuos peligrosos), la forma de almacenamiento de productos o residuos, la presencia histórica de tanques enterrados y su problemática específica, las potenciales fuentes históricas de contaminación del suelo y las modificaciones producidas en la distribución de las instalaciones.

La descripción del uso actual del suelo del emplazamiento deberá aportar la información necesaria para la identificación de los potenciales contaminantes que pueden llegar al subsuelo.

La información a obtener debe centrarse en aquellos aspectos que faciliten identificar indicios de afección al suelo y la posterior planificación de la toma de muestras y análisis del mismo. Durante la visita al emplazamiento se confirmará la información recopilada durante esta etapa.

Cuadro 6.2 Datos de interés relativos a la actividad desarrollada en el emplazamiento
<p>Actividades industriales (en activo o no):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Descripción de los procesos productivos relevantes (diagramas de flujo, productos y residuos). • Materias primas (Tipos, estado físico, forma de almacenamiento, etc.). • Residuos (Tipos, estado físico, forma de almacenamiento, etc.). • Localización de las zonas de almacenamiento de materias primas (localización en plano e indicación de las medidas de protección ambiental existentes). • Localización de las zonas de almacenamiento de residuos (localización en plano, medidas de protección ambiental y segregación en función del tipo). • Presencia de depósitos enterrados (localización, productos almacenados, volúmenes y distribución). • Sistemas de protección medioambiental (zonas pavimentadas, drenajes, cubetos, etc.). • Puntos de vertido al SIS (Sistema Integral de Saneamiento) o a cauce. <p>Otras actividades:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zonas de vertido (antiguas o actuales): extensión, tipo de vertido, límites, medidas de protección ambiental, etc. • Otros aspectos de interés.

Con esta información se elaborará un plano de localización de los elementos anteriormente descritos, de manera que pueda conocerse la localización de las fuentes potenciales de contaminación del suelo.

Este plano servirá, además, para la visita al emplazamiento y para diseñar, en caso de que fuera necesario, el programa de muestreo del suelo.

En el caso de la caracterización inicial para el establecimiento del *Blanco Ambiental de la Situación Preoperacional* de actividades industriales, un aspecto importante que deberá describirse en este apartado es la definición de las obras previstas para la construcción de las instalaciones. El muestreo del subsuelo y la posterior analítica de los elementos contaminantes seleccionados deberán servir como caracterización de la situación antes de la construcción de la instalación, para poderla comparar con la calidad del medio una vez iniciada la actividad.

Para completar el estudio histórico se recabará información relativa a la evolución de los

usos de los suelos de los alrededores del emplazamiento. Se hará especial hincapié en la situación actual, la cual puede ser de ayuda a la hora de establecer posibles fuentes de contaminación externas al emplazamiento en estudio y/o posibles receptores potenciales.

Se deberá incluir la presencia tanto de la actividad industrial, indicándose actividades predominantes y ubicación geográfica en relación con la parcela de interés, como la de áreas residenciales, parques, jardines y vertederos. Así mismo incluirá información relativa a localización de espacios de interés paisajístico o natural, espacios especialmente protegidos de la comunidad, etc.

Cuadro 6.3 Principales aspectos en el estudio de usos del suelo del entorno
<ul style="list-style-type: none"> • Uso industrial (Principales actividades desarrolladas, identificación de contaminantes potencialmente presentes, localización con respecto a la parcela de interés). • Uso residencial (Identificación de tipo de viviendas, ubicación con respecto a la parcela de interés, presencia de pozos, sótanos, garajes subterráneos, otros usos). • Uso recreativo (Parques públicos o privados, identificación de áreas de especial interés). • Areas protegidas (Identificación de áreas especialmente protegidas y localización con respecto a la parcela de estudio).

Por último y para facilitar la comprensión del contexto actual del uso de los suelos de la zona y la posible existencia de contaminación en la parcela de interés, se elaborará un mapa de usos del suelo, indicando las principales actividades.

En el cuadro 6.4 se resumen los datos de interés para el estudio histórico del emplazamiento y su entorno.

En la tabla 6.1 se recoge un resumen de fuentes de información que pueden servir para la elaboración del estudio histórico. El listado no pretende ser exhaustivo de todas las posibles fuentes de consulta existentes, sino servir como referencia para afrontar dichos trabajos.

Cuadro 6.4 Resumen de datos de interés para el estudio histórico del emplazamiento y su entorno
<p>Aspectos de carácter general:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evolución de los usos del suelo del emplazamiento (usos industriales: antiguas zonas de almacenamiento de residuos, materias primas, etc., uso agrícola, uso residencial, huertas, etc.). • Evolución de los usos del suelo del entorno inmediato (presencia de actividades potencialmente contaminantes, zonas de vertido, etc.). • Evolución topográfica de la zona (cartografía histórica, fotografías aéreas). <p>Aspectos relacionados con la actividad desarrollada en el emplazamiento:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evolución de la distribución de los elementos del emplazamiento (presencia de zonas edificadas y zonas libres, etc.). • Evolución de procesos productivos o actividades desarrolladas. • Composición de los principales productos o contaminantes potenciales: materias primas, productos, residuos y efluentes generados, vertidos, etc. • Zonas de almacenamiento de materias primas, productos y residuos, sistemas de contención y protección medioambientales. • Principales emisiones. • Evolución en la gestión de residuos peligrosos. Localización de zonas de almacenamiento temporal. <p>Sucesos más relevantes</p> <ul style="list-style-type: none"> • Accidentes ocurridos en el emplazamiento (vertidos accidentales, incendios, fugas, etc.). • Denuncias e inspecciones. • Quejas. • Otros. <p>Fuentes de información</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fuentes de información consultadas: fuentes documentales, entrevistas a trabajadores, vecinos, autoridades locales, observaciones directas, etc.

Tabla 6.1 Resumen de fuentes de información			
Organismo	Información	Teléfono	Internet
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid	- Áreas Temáticas : - Suelos - Residuos - Atmósfera - Agua - Biodiversidad y paisaje - Educación ambiental - Protección ciudadana - Asentamientos humanos - Cartografía Ambiental - Documentación ambiental - Atención e información ambiental - EIONET (red de información y observación medioambiental)	91-580 39 00	http://medioambiente.madrid.org/jsps/portada.jsp
		012 Información	www.madrid.org
Confederación Hidrográfica del Tajo	- Información hidrológica e hidrogeológica - Aspectos físicos y datos socioeconómicos de la cuenca - Usos y aprovechamiento de las aguas subterráneas	91-535 05 00	www.chtajo.es
Dirección General de Urbanismo y Planificación Regional	- Servicio Cartográfico (planos y fotografías aéreas) - Ordenación del territorio (instrumentos y planificación) - Gestión urbanística	91-580 31 00 Secretaría General Técnica. Consejería de Transportes e Infraestructuras de la C.Madrid. 91-580 44 68 Cartoteca	www.madrid.org/cobras_publicas/guiaservicios/fu_ncdgupr.htm
Dirección General del Catastro	- Ortofotografías - Cartografía - Información catastral	91-583 66 90 902 37 36 35 Línea directa	www.catastro.minhac.es/
Instituto Geográfico Nacional. Centro Nacional de Información Geográfica (C.N.I.G.)	- Cartografía - Fotografía aérea	91-597 95 91 Sección de Cartografía	www.mfom.es/ign/ www.cnig.es
Instituto Nacional de Meteorología	- Información meteorológica	91-581 98 10 Unidad de Información Meteorológica 91-573 37 79 Centro Meteorológico Territorial en Madrid y Castilla-La Mancha	www.inm.es/

Tabla 6.1 (continuación) Resumen de fuentes de información			
Organismo	Información	Teléfono	Internet
Instituto Geológico y Minero de España	- Información hidrogeológica - Recursos minerales, riesgos geológicos y geoambiente - Geología y geofísica - Sistemas de información geográfica	91-349 57 00	www.igme.es/internet/principal.asp
Cámaras de Comercio	- Información sobre actividades industriales	91-538 35 00	www.camerdata.es www.cscamaras.es www.camaramadrid.es
Registro de la propiedad	- Situación jurídica de las empresas y de los bienes inmuebles en general. - Propietarios, evolución histórica	902 02 12 52	www.registradores.org
Registro mercantil	- Información de Empresas	91-563 12 52	www.rmc.es

6.4.3. Estudio del medio físico

El conocimiento de las características del medio físico del emplazamiento es necesario para identificar el grado de vulnerabilidad del mismo, los mecanismos de movilización de los potenciales contaminantes y el alcance potencial de la afección al suelo del emplazamiento.

Los aspectos del medio físico que presentan un mayor interés en los estudios de investigación preliminar de la calidad del suelo son los siguientes: a) encuadre geológico e hidrogeológico del emplazamiento; b) hidrogeología local; c) usos de las aguas subterráneas; d) características litológicas del subsuelo; e) climatología local y f) relaciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas.

Esta información se considera fundamental a la hora de establecer los posibles mecanismos de movilización de los contaminantes en el medio natural, y por tanto la posible vía de comunicación entre la fuente y los receptores potenciales. La información servirá, de igual modo, para establecer el programa de muestreo y análisis más adecuado en función del medio a caracterizar y la adopción de las técnicas de muestreo más apropiadas.

El estudio deberá incluir por ello los aspectos básicos relacionados con el medio físico local del emplazamiento que se presentan en el cuadro 6.5.

La escala de trabajo deberá ser la adecuada para la consecución de los objetivos de la caracterización inicial. Para ello se utilizará la cartografía de detalle necesaria, así como aquella documentación e información que se considere oportuna.

Un elemento muy importante en la caracterización del emplazamiento es la identificación de los puntos de agua existentes que puedan verse afectados.

El inventario de los puntos de agua incluirá tanto pozos como sondeos, arroyos o cursos de agua permanentes. Se incluirán todos aquellos considerados relevantes teniendo en cuenta las condiciones hidrogeológicas locales (puntos localizados aguas arriba y aguas abajo del emplazamiento, unidad hidrogeológica explotada, usos del agua, etc.).

Cuadro 6.5 Datos más relevantes para el estudio del medio físico
<ul style="list-style-type: none"> • Mapa topográfico (identificación de cursos de agua superficial, topografía, accesos). • Climatología local (régimen de lluvias, pluviometría, dirección predominante del viento, evapotranspiración potencial, etc.). • Contexto geológico regional a partir de fuentes bibliográficas (estratigrafía, litología esperada). • Identificación de la/s Unidad/es Tipo representativa en la que se encuadra la zona de estudio, con el fin de definir los valores de fondo regionales que se adoptarán como referencia. • Identificación de las unidades hidrogeológicas que puedan verse afectadas. • Caracterización hidrogeológica básica para la identificación de posibles vías de movilización de la contaminación a partir de fuentes bibliográficas (Profundidad al agua subterránea, tipo de acuífero, parámetros hidrogeológicos básicos: permeabilidad, gradiente hidráulico, dirección de flujo, transmisividad, etc.). • Relaciones aguas subterráneas y aguas superficiales. • Identificación de puntos de agua. (pozos, piezómetros o sondeos en el emplazamiento y/o alrededores, usos, otros puntos de agua de interés).

La información necesaria puede consultarse en las fuentes de información existentes (IGME, Confederaciones Hidrográficas, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Ayuntamientos, etc.) y realizar visitas a la zona con el fin de confeccionar el inventario de puntos de agua lo más actualizado posible.

6.4.4. Desarrollo del modelo conceptual inicial del emplazamiento

El desarrollo del modelo conceptual es una herramienta a través de la cual se obtiene una *fotografía* de las condiciones del emplazamiento, ilustrando la distribución de las potenciales fuentes contaminantes, mecanismos de vertido, vías de exposición y mecanismos de migración, así como los receptores potenciales existentes. El desarrollo del modelo conceptual se apoya en mapas, esquemas, cortes litológicos, hidrogeológicos, distribución de puntos potencialmente contaminantes, que ilustran tanto los potenciales focos o fuentes de afectación como las vías de movilización y receptores potencialmente existentes.

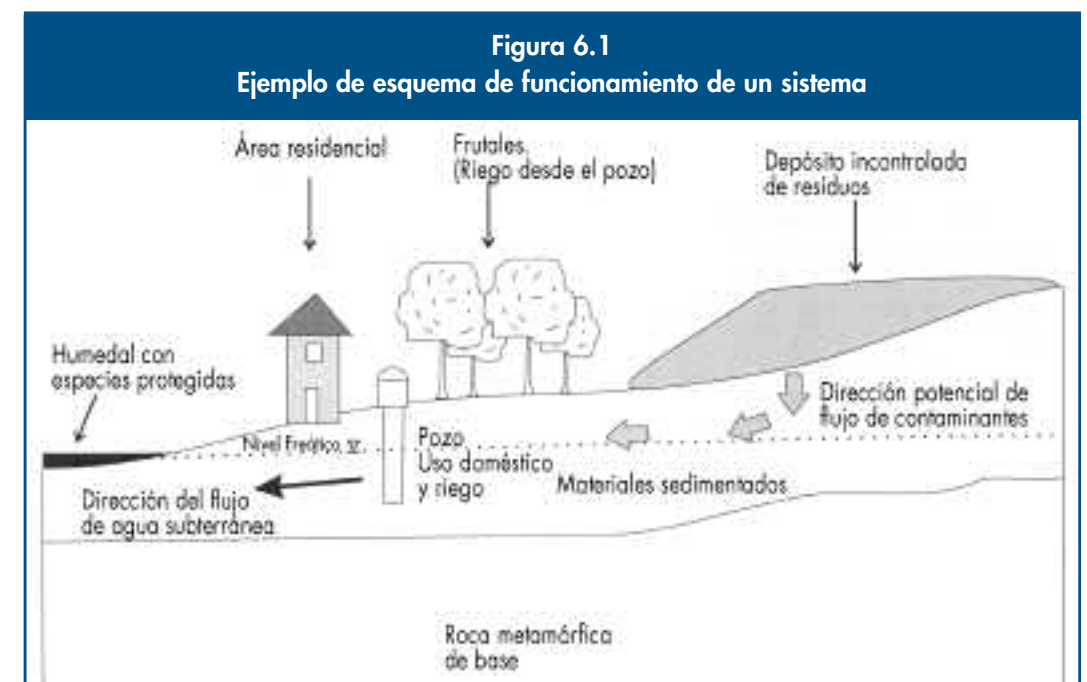
Para que la información obtenida sea aprovechada y se adapte a los objetivos previstos (es decir, para que no haya un exceso de la misma) es necesario organizarla y enfocarla en base a tres aspectos fundamentales:

- Identificación de la existencia o no de focos y fuentes potenciales de contaminación: potenciales contaminantes, identificación de tipos, características y localización en el emplazamiento.
- Identificación de las características del medio físico: mapa de vulnerabilidad del medio, usos del suelo, elementos hidrogeológicos de interés (litología, dirección esperada de flujo, presencia de puntos de agua), cursos de agua superficial, etc.
- Identificación de posibles vías de movilización, exposición y receptores: usos del suelo, esquema con la hipótesis de movilización de los contaminantes potenciales y vías previas de exposición.

Con toda la información obtenida, se elabora una primera hipótesis de trabajo que intente explicar el funcionamiento del sistema. Para ello puede realizarse un esquema del emplazamiento, resaltando las fuentes de la contaminación potencial, las potenciales vías de exposición y los receptores.

Junto al esquema, deben resumirse los datos más importantes recogidos en las etapas anteriores, con el fin de preparar de manera adecuada el reconocimiento del emplazamiento.

En la figura 6.1 se representa un esquema simplificado del funcionamiento del sistema en un determinado emplazamiento.



La buena organización de la información básica recogida y el esfuerzo realizado de comprensión del problema a afrontar van a permitir que la visita al emplazamiento sea efectiva.

Con los datos previos o bien durante el proceso de obtención de los mismos (hay veces que es preciso visitar el emplazamiento antes de haber conseguido la mayoría de los datos de interés), se procede a la visita del emplazamiento. Para ello es importante contar con ciertos instrumentos básicos (mapas topográficos a escala, cámara, etc.) para la obtención de información adicional. Durante el reconocimiento del emplazamiento pueden actualizarse los datos obtenidos, marcándose la localización de edificios en los mapas topográficos con los que se cuenta, posibles fuentes de contaminación, pozos, zonas sensibles, etc.

Basándose en la nueva información obtenida como consecuencia de la visita al emplazamiento, se contará con un esquema más aproximado del modelo conceptual del sitio en estudio.

Cuadro 6.6 Instrumentos y aspectos clave para la visita al emplazamiento	
Instrumento	Aplicación
<ul style="list-style-type: none"> • Lista de chequeo de material a llevar (ejemplo en Anexo 1). 	Evita realizar las visitas sin los elementos necesarios para la toma de datos que pueden ser cruciales para las etapas posteriores.
<ul style="list-style-type: none"> • Formularios con datos más importantes a extraer de la visita de campo o enfoque de la misma. 	Facilita la obtención de los datos más relevantes de cara a plantear el programa de muestreo posterior (litología, presencia zonas pavimentadas, accesos, comentarios de interés, etc.).
<ul style="list-style-type: none"> • Mapas y esquemas. Localización de residuos, edificios, áreas de actividad. 	Facilitan la actualización de datos y la revisión de los puntos clave del emplazamiento.
<ul style="list-style-type: none"> • Encuesta a trabajadores, vecinos, autoridades locales. 	Permite la obtención de datos que puedan haberse escapado en etapas anteriores.

Con todos los datos obtenidos se actualiza el modelo conceptual inicial con el fin de establecer y preparar las tareas posteriores.

6.4.5. Conclusiones del estudio de Caracterización Inicial

Como tarea final de la caracterización inicial del emplazamiento y a partir de la obtención del modelo conceptual del mismo, se decidirá si es preciso llevar a cabo la siguiente etapa del proceso de investigación (Caracterización Analítica) o si por el contrario puede darse por finalizado el proceso.

La justificación de la decisión adoptada se recogerá en un documento en el que se incluirá un resumen de todos los trabajos llevados a cabo durante el proceso de Caracterización Inicial.

6.5. Caracterización Analítica

En aquellos casos en los que como conclusión del proceso de Caracterización Inicial se determine la necesidad de continuar con las labores de investigación del emplazamiento, se llevará a cabo la Caracterización Analítica, la cual tiene por objeto determinar si existe una afección significativa o no en el emplazamiento.

El proceso de la Caracterización Analítica se inicia con la definición de la estrategia a adoptar con el fin de obtener los datos necesarios para poder alcanzar una conclusión justificada. A partir de dicha estrategia se procederá a la realización de los trabajos - toma de muestras de suelo, análisis *in situ*, laboratorio, etc. - que se consideren necesarios. El final del proceso consiste en la recopilación y análisis de toda la información que justificará si existe o no afección significativa del medio. Cada una de las tareas comentadas se desarrolla a continuación.

6.5.1. Definición de la estrategia de obtención de datos

A partir del modelo conceptual inicial del emplazamiento en estudio, se identificarán los datos que sean necesarios para la caracterización analítica del mismo. En primer lugar se planificará el programa de muestreo y análisis del suelo, se definirán los métodos de muestreo a utilizar y el sistema de calidad que se empleará para la adecuada obtención de los datos, así como las medidas de seguridad e higiene necesarias para los trabajos de campo, en función de los contaminantes potenciales involucrados (Ver capítulo 8).

Los objetivos del muestreo son:

- a) Determinar la concentración de los contaminantes existentes en el emplazamiento para, comparándolos con Concentraciones Orientativas de la Calidad del Suelo (COCS), poder concluir si existen indicios de afección significativa o no.
- b) Recopilar aquellos datos necesarios para completar el modelo conceptual del emplazamiento para etapas posteriores.

6.5.2. Programa de muestreo y análisis del suelo

Para planificar los trabajos de campo que se llevarán a cabo durante la Caracterización Analítica pueden consultarse los capítulos 8 a 10 de esta guía, en los que se recogen criterios e información detallada para desarrollar dichas tareas.

Programa de muestreo

El programa de muestreo en esta fase de investigación debe ir enfocado a la obtención de datos relativos a la calidad del suelo del emplazamiento que permitan confirmar si existen o no indicios significativos de afección del mismo.

Siguiendo el criterio general descrito en el capítulo 8 para la distribución y establecimiento del número de puntos de muestreo, cualquier emplazamiento puede dividirse en tres grupos, en función de la hipótesis de distribución de la contaminación potencial:

1. Zonas en las que no se espera que exista afección.
2. Zonas en las que se sospecha la existencia de afección y ésta esté localizada.
3. Zonas en las que se sospecha la existencia de afección pero no se conoce su localización.

En cada uno de estos casos debe adoptarse una hipótesis de trabajo diferente, según se indica a continuación:

Zonas sin indicios de afección

Los puntos de muestreo pueden localizarse siguiendo una distribución regular que abarque todo el emplazamiento. Es recomendable un número de puntos de muestreo no inferior a 2 por hectárea para grandes superficies. En el caso de emplazamientos de pequeña superficie, puede ser suficiente con la toma de muestras de suelo en mallas cuadradas de 25 a 50 metros de lado. En cualquier caso, la distribución y número de puntos de muestreo debe ser evaluada en cada caso particular por el equipo investigador, teniendo en cuenta las características específicas del emplazamiento.

En aquellos casos en los que el contexto hidrogeológico del emplazamiento, así como el inventario de puntos de agua realizado, pongan de manifiesto la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación, deberá considerarse la necesidad de su muestreo.

En el caso de la localización de los puntos de muestreo de las aguas subterráneas se tendrán en cuenta las condiciones hidrogeológicas locales, considerando siempre la necesidad de contar con datos localizados aguas arriba y aguas abajo de la zona de interés.

Zonas sospechosas con localización conocida

Tal es el caso de aquellas zonas que se hayan identificado con indicios de afección a partir de la Caracterización Inicial, por ejemplo, tanques enterrados con fallos de estanqueidad, vertidos, antiguas zonas de almacenamiento de residuos, etc.

La distribución, número de puntos de muestreo y profundidad de prospección se ajustarán en función de las características particulares de dichas áreas, pudiéndose distinguir básicamente las siguientes situaciones:

Depósitos enterrados: se localizará al menos un punto de muestreo aguas abajo y cercano al área de los depósitos enterrados sospechosos, manteniendo una distancia de seguridad adecuada. Se tendrá en cuenta, además, la posibilidad de tomar muestras en las zonas asociadas a bocas de carga o tuberías de distribución según los casos. La profundidad del muestreo alcanzará, al menos, 2 metros por debajo de la base de los depósitos enterrados de mayor capacidad. En caso de que exista agua subterránea susceptible de verse afectada por una potencial contaminación asociada a los depósitos (esto dependerá fundamentalmente de la profundidad del nivel freático y de la naturaleza de los materiales existentes entre los depósitos y el agua subterránea), deberá preverse su muestreo, en cuyo caso la profundidad total del mismo será de al menos 2 metros por debajo del nivel freático existente.

Focos y/o fuentes conocidos: la distribución de los puntos de muestreo dependerá del tamaño esperado del foco. En general se seguirá la pauta de tomar, al menos, 1 muestra por foco conocido. En aquellos casos en los que la superficie esperada de la zona afectada sea

grande se tomarán no menos de 2 muestras por hectárea en las zonas más próximas a la fuente de la contaminación potencial. En el caso de que existan aguas subterráneas o superficiales de interés que puedan verse afectadas, se tomarán, al menos, 3 muestras: una aguas arriba del área afectada, otra aguas abajo y la última en el área potencialmente afectada, de manera que pueda valorarse la afección al medio.

Contaminación difusa: en este caso la localización de los puntos de muestreo seguirá una distribución regular en toda la zona de estudio, tomando muestras a intervalos regulares. El número de puntos de muestreo será de, al menos, 2 muestras por hectárea, en el caso de grandes superficies, y de 1 muestra cada 25 - 50 metros en el caso de pequeñas áreas.

Zonas sospechosas con localización desconocida

Si una vez recopilada toda la información previa se sospecha que puede existir cierta contaminación en el emplazamiento pero no se dispone de información acerca de su localización, deberá seguirse una estrategia diferente de cara a su localización y número de los puntos de muestreo.

Esta estrategia dependerá fundamentalmente de la información recogida y de las características particulares del emplazamiento. Es complejo definir un método preciso para este tipo de situaciones, por lo que deberían seguirse los siguientes criterios:

En primer lugar, la estrategia deberá dirigirse a intentar obtener más información acerca de dicha contaminación. Esta información a veces puede obtenerse a partir de entrevistas con antiguos empleados o personas que vivan en la zona. A partir de esa nueva información se elaboraría una nueva hipótesis acerca de las características de la contaminación (difusa o puntual, extensión de la contaminación, tipo de contaminantes, etc.).

Otra estrategia a utilizar es el empleo de técnicas de investigación de tipo no intrusivo (como por ejemplo GPR – *Ground Penetrating Radar*, o EM – Electromagnetismo) o un programa de muestreo siguiendo patrones de distribución regular de los puntos de muestreo. La distancia entre los puntos de muestreo dependerá entonces del tamaño esperado de la contaminación y/o de la superficie total del emplazamiento que va a ser investigado.

Programa analítico

El programa analítico ha de incluir los parámetros físicos y químicos a analizar, los Criterios Orientativos de la Calidad del Suelo (COCS) que van a utilizarse, la metodología analítica a emplear, así como el plan de calidad adoptado para asegurar la bondad de los datos obtenidos.

Para el desarrollo de estas tareas pueden tenerse en cuenta los aspectos, criterios y consideraciones contemplados en los capítulos 9 y 10 de esta guía.

Los parámetros a analizar en cada una de las muestras dependerán, fundamentalmente, de la actividad potencialmente contaminante desarrollada en la zona y su evolución histórica. En la tabla 10.1 se recoge una relación de actividades industriales y contaminantes potenciales asociados; en cualquier caso antes de decidir los análisis que se llevarán a cabo debe evaluarse detenidamente el estudio histórico del emplazamiento.

En aquellos estudios en los que el objetivo a alcanzar con esta fase sea confirmar si existe o no afección significativa del suelo del emplazamiento, se identificarán los Criterios Orientativos de la Calidad del Suelo (COCS) con los que se van a comparar los resultados de la campaña analítica. Su selección se realizará teniendo en cuenta la normativa que sea aplicable, si esta existiera. En caso contrario se tendrán en consideración, a efectos de valoración de resultados, normativas o criterios de otras comunidades autónomas o países.

En aquellos casos en los que el objetivo del estudio sea establecer la calidad del suelo antes de desarrollar sobre él una actividad determinada (por ejemplo, en el caso del Blanco de la Situación Ambiental Preoperacional), además de los COCS que puedan servir como referencia, se identificarán los niveles de fondo aplicables, bien por normativa aplicable o legislaciones, bien por criterios de referencia externos.

El programa de muestreo y análisis deberá ir acompañado de un Plan de Calidad que asegure la bondad de los datos obtenidos. Este Plan deberá incluir todos aquellos aspectos que se han tenido en cuenta durante el muestreo y análisis encaminados para reducir las posibles fuentes de error.

Selección de las técnicas de muestreo

Antes de proceder a programar los trabajos de campo que se llevarán a cabo para alcanzar los objetivos de la Investigación Preliminar, se hará una revisión de las técnicas de investigación disponibles (ver capítulo 9).

La mayor parte de los datos necesarios para alcanzar los objetivos de la Investigación Preliminar pueden ser obtenidos por medio de técnicas de investigación geológica e hidrogeológica.

La decisión de adoptar una técnica u otra dependerá del alcance del estudio, así como de las condiciones particulares del emplazamiento. En la Investigación Preliminar los datos a obtener son de carácter general, por lo que primarán las consultas bibliográficas y reconocimientos generales de campo, es decir, se seleccionarán aquellas técnicas que permitan la obtención de datos de carácter general. En la Investigación Detallada se seleccionarán las técnicas específicas para la obtención de datos de detalle. En cualquier caso, la selección de una técnica u otra en cada situación vendrá justificada por los objetivos que el estudio pretenda.

Del conjunto de técnicas disponibles, las más sencillas para el muestreo de suelos incluyen herramientas de tipo manual capaces de obtener un testigo continuo del suelo a medida que se va profundizando en él. En otros casos, en función de las características particulares del emplazamiento o bien como consecuencia del alcance del estudio de investigación, puede requerirse el empleo de técnicas más complejas para la toma de muestras. El Capítulo 9 recoge las técnicas de exploración utilizadas en estudios de Investigación de la Calidad del Suelo, tanto para la caracterización de los aspectos geológicos como hidrogeológicos, así como las diferentes técnicas de obtención de muestras en los distintos medios de interés.

Medidas de seguridad e higiene para los trabajos de campo

Con anterioridad a la realización de los trabajos de campo deberán tomarse las precauciones oportunas de cara a la protección de la salud y seguridad del equipo de investigación que vaya a participar en las labores de muestreo y análisis *in situ*. Deberá tenerse en cuenta la exposición potencial a contaminantes por parte del equipo de trabajo y, en su caso, prever los medios de protección individual o colectiva necesarios para dichas labores.

Para ello, todo trabajo de investigación de la contaminación del suelo que implique la toma de muestras deberá evaluar los riesgos potenciales a los que se verán sometidos los trabajadores o personas del entorno, tanto de tipo químico (exposición a contaminantes tóxicos o cancerígenos), como de tipo físico o mecánico (riesgo de golpes, atrapamientos, etc., como consecuencia de la manipulación de equipos o maquinaria pesada).

Por otro lado y antes de proceder a la toma de muestras de suelo o de aguas subterráneas deberán identificarse y localizarse aquellos servicios enterrados que pudieran verse afectados por la ejecución de los trabajos proyectados tales como conducciones eléctricas, telefonía, gas, etc., con el fin de evitar accidentes.

En el apartado 8.5 se recoge información de interés a este respecto.

6.5.3. Conclusiones para trabajos posteriores

Con toda la información recogida y una vez realizada la caracterización analítica del emplazamiento, se procederá al análisis de los datos obtenidos.

Todos los datos se recogerán en un informe recopilativo que irá enfocado hacia los siguientes aspectos:

- Información relativa a las características del medio físico, aspectos que condicionan su vulnerabilidad y cuantos aspectos se consideren de interés.
- Medio antrópico: actividad desarrollada, principales aspectos que condicionan la afección potencial del medio, etc.
- Caracterización de la afección: principales contaminantes, zonas y medios afectados, concentraciones de contaminantes en cada medio, etc.
- Posibles vías de movilización y receptores potenciales.

El informe deberá recoger la justificación y desarrollo de las diferentes etapas de estudio, indicando los criterios utilizados para la adopción de los programas de muestreo y análisis llevados a cabo, así como aquellas consideraciones que el equipo de investigación considere oportunas.

La información básica que se deberá incluir al final de los trabajos se recoge en el siguiente cuadro:

Cuadro 6.7 Datos a incluir en el informe de la investigación preliminar
<p><i>En cualquier tipo de emplazamiento:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Aspectos geográficos (mapa topográfico y localización de finca, término municipal, coordenadas, accesos). • Estudio histórico (evolución de los usos del suelo en el emplazamiento y entorno, principales actividades, identificación de potenciales fuentes de contaminación en el emplazamiento o entorno, propietarios y poseedores actuales e históricos). • Usos de los suelos de los alrededores (mapa de distribución de actividades y usos del suelo). • Datos de la actividad (nombre de la/s empresa/s, dirección, actividad, descripción de procesos e instalaciones, principales fuentes contaminantes potenciales, plano con los principales aspectos de interés). • Descripción del medio físico (topografía, contexto geológico e hidrogeológico, hidrología, aspectos climatológicos de interés, vulnerabilidad del medio). • Modelo conceptual inicial del emplazamiento. <p><i>En emplazamientos con indicios de afección y Blanco Ambiental de la Situación Preoperacional:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Programa de muestreo y análisis del suelo y de las aguas subterráneas (justificación de los trabajos de campo realizados, número y distribución de puntos de muestreo, limitaciones, tipo de medios muestreados, parámetros analizados, métodos analíticos). • Resultados analíticos obtenidos en los diferentes medios. Valores de referencia utilizados, caracterización analítica del emplazamiento. • Conclusiones. (Aspectos de interés a tener en cuenta para la prevención de la contaminación o trabajos posteriores de investigación del suelo). • Revisión del modelo conceptual incorporando los resultados obtenidos de la caracterización analítica y los trabajos de campo efectuados.

CAPÍTULO 7

7.1. Introducción

7.2. Objetivos

7.3. Proceso de la Investigación detallada

7.3.1. Revisión del Modelo Conceptual inicial

7.3.2. Obtención de datos

7.3.3. Definición del Modelo Conceptual

7.4. Informe resumen

FASE 2: INVESTIGACIÓN DETALLADA DE LA CALIDAD DEL SUELO

7.1. Introducción

La decisión de proceder a la realización de una Investigación Detallada de la calidad del suelo de un emplazamiento vendrá condicionada por los resultados obtenidos en la fase de Investigación Preliminar, descrita en el anterior capítulo, y por la necesidad de obtener información complementaria, más específica y detallada, requerida para una correcta elaboración del Análisis de Riesgos.

En la mayoría de los casos, la necesidad de realizar una evaluación de riesgos se establece si existe una afección significativa de alguno de los medios implicados, es decir, cuando se superan los correspondientes Criterios Orientativos de Calidad del Suelo (COCS), se hace necesario acometer esta segunda fase de investigación de carácter detallado, enfocada hacia aspectos particulares que han quedado fuera del alcance de la fase de investigación preliminar.

Puede darse la situación en la que la información obtenida en la primera fase de estudio sea suficiente para abordar la evaluación de las alternativas de recuperación del emplazamiento y llevar a cabo las labores de recuperación. En estos casos no será necesaria una Investigación Detallada del emplazamiento, y por tanto esta etapa podrá no ponerse en marcha (tal es el caso, por ejemplo, de aquellos emplazamientos en los que se prevea realizar una retirada total del suelo contaminado por motivos constructivos, acción que se entiende que implicará alcanzar en el suelo remanente una concentración de contaminantes por debajo de los COCS).

A continuación se detallan los aspectos más importantes a abordar en el desarrollo de la Investigación Detallada de la calidad del suelo de un emplazamiento.

7.2. Objetivos

La finalidad de la Investigación Detallada es determinar si el riesgo potencial existente para la salud humana y/o los ecosistemas puede o no considerarse aceptable. En aquellos casos en los que exista un riesgo inaceptable para la salud humana o los ecosistemas, deberán definirse los objetivos de calidad del suelo específicos a alcanzar durante las labores de recuperación.

Como objetivos particulares se consideran los siguientes:

1. Definición del alcance de la afección del medio. Identificación de los focos de contaminación, delimitación de las áreas afectadas tanto horizontal como verticalmente. Evolución temporal y espacial.
2. Caracterización geológica, hidrológica, hidrogeológica y geoquímica del emplazamiento.
3. Identificación y caracterización de los mecanismos de movilización de los contaminantes. Potenciales vías de exposición a los contaminantes por parte de receptores potenciales actuales y futuros. Definición del modelo conceptual.
4. Datos para el diseño de los métodos de recuperación a emplear o para la elaboración del Plan de Control y Seguimiento Ambiental a desarrollar.

7.3. Proceso de la investigación detallada

El proceso de la Investigación Detallada consiste en una secuencia de actuaciones que engloban diferentes tareas (ver figura 1, correspondiente al esquema general de la gestión de suelos contaminados en la Comunidad de Madrid).

De manera general puede resumirse en las siguientes:

1. Caracterización detallada: en la que se procede a elaborar un modelo conceptual revisado en base a la información previa existente y en el que se definirá, a partir de la toma y análisis de muestras de los diferentes medios de interés, el alcance de la contaminación. Los datos recogidos en el modelo conceptual servirán para la elaboración del Análisis de Riesgos.
2. Identificación de riesgos y su cuantificación a partir del Análisis de Riesgos.
3. Definición de los objetivos de calidad para la recuperación, en caso de que se identifique la existencia de riesgos inaceptables como consecuencia de la calidad del suelo del emplazamiento.

En esta Guía se desarrollan los aspectos metodológicos de los trabajos a realizar durante la Caracterización Detallada y en concreto para la elaboración del Modelo Conceptual del emplazamiento que servirá de base para la elaboración del Análisis de Riesgos para la Salud Humana y los Ecosistemas, labores éstas últimas que quedan fuera del alcance de esta Guía (ver Guía de Análisis de Riesgos).

En el cuadro 7.1 se recogen las tareas parciales a realizar, incluidas en la secuencia de actuaciones ya comentada.

Cuadro 7.1	
Investigación Detallada de la Calidad del Suelo. Síntesis de tareas	Ver apartado
<p>I. Revisión del Modelo Conceptual inicial</p> <ul style="list-style-type: none"> • Revisión de la información existente (Investigación Preliminar, otras fuentes) relativa a: <ul style="list-style-type: none"> - Estudio histórico del emplazamiento. - Estudio del medio físico. - Análisis de la afección detectada. • Revisión del modelo conceptual inicial con el fin de establecer la estrategia de muestreo. <ul style="list-style-type: none"> - Identificación de fuentes potenciales de contaminación. - Identificación de las características del medio físico. - Identificación de posibles vías de movilización, exposición y receptores. <p>II. Estrategia de obtención de datos necesarios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo del programa de prospección, muestreo y análisis de suelos y otros medios de interés (aguas subterráneas, aguas superficiales, aire intersticial, etc.) para determinar el alcance de la afección. • Selección de técnicas de prospección y muestreo. • Definición de las medidas de seguridad e higiene necesarias para los trabajos de campo. • Ejecución de los trabajos de campo y laboratorio. • Valoración de resultados. <p>III. Definición del Modelo Conceptual del emplazamiento</p> <ul style="list-style-type: none"> • Caracterización geológica e hidrogeológica del emplazamiento. • Caracterización del alcance de la afección al medio. Contaminantes presentes, medios afectados, distribución espacial, caracterización analítica. • Caracterización del comportamiento de la contaminación en el medio: mecanismos de movilización, evolución espacial y temporal. Modelos matemáticos. • Vulnerabilidad del medio: receptores potenciales, poblaciones expuestas, vías de exposición a considerar en el Análisis de Riesgos. <p>IV. Elaboración del Análisis de Riesgos para la Salud Humana y Ecosistemas</p> <p>V. Conclusiones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Definición de la existencia o no de riesgos para la salud humana y/o ecosistemas. • Definición de los objetivos de recuperación a alcanzar. • Elaboración de informe conclusivo en el que se reflejen las siguientes etapas a acometer. 	<p>7.3.1.</p> <p>7.3.2.</p> <p>7.3.3.</p> <p>Guía temática</p>

7.3.1. Revisión del Modelo Conceptual inicial

Durante la Investigación Preliminar y como consecuencia de los trabajos realizados en aquella etapa, se cuenta con un modelo conceptual inicial del emplazamiento. La primera tarea de la Caracterización Detallada consistirá en la recopilación de toda la información existente para su revisión.

Revisión de la información existente

La elaboración de un modelo conceptual revisado del emplazamiento se basa en la obtención y evaluación de datos existentes sobre el mismo. Estos datos incluirán: datos históricos, fotografías aéreas, mapas, condiciones locales o regionales que sean relevantes para definir la presencia de contaminantes en los diferentes medios (movilidad de contaminantes). Para mayor detalle de la información de interés deben consultarse los apartados 6.4.2 y 6.4.3 descritos en el capítulo 6 de esta guía.

Las fuentes para la obtención de dicha información incluyen todos los trabajos previos realizados en el emplazamiento durante la Investigación Preliminar y cualquier otra información que no hubiera quedado recogida en las etapas anteriores, bien porque se hubiera generado con posterioridad, bien porque no hubiera sido tomada en consideración.

Revisión del modelo conceptual

Para poder planificar el programa de muestreo y los trabajos de campo necesarios para la caracterización de detalle, se revisará el modelo conceptual inicial prestando especial atención a los siguientes aspectos:

- Identificación y descripción de los focos potenciales de contaminación: definición de tipos de focos (activos o inactivos), fuentes, dimensiones, localización espacial y otros aspectos de interés.
- Identificación y descripción de cada una de las fuentes potenciales de contaminación existentes: descripción del tipo de distribución espacial esperada y alcance de la afección, medios afectados (suelo, agua subterránea, etc.), tipo de contaminante involucrado y concentraciones detectadas.
- Identificación y descripción del medio físico: características significativas del medio físico que ayuden a planificar las tareas para la obtención de datos. Características litológicas del emplazamiento, accesibilidad, hidrogeología, usos del suelo (incluidas las aguas subterráneas), aspectos geoquímicos, aspectos climáticos de interés (pluviometría, régimen de vientos, etc.), topografía, hidrología, otros datos de interés.
- Identificación de posibles vías de movilización, exposición y receptores potenciales de interés.
- Evolución espacial y temporal de la afección. Identificación de la necesidad o no de contar con datos para la realización de modelos de comportamiento de la contaminación en el medio: modelos de flujo, de transporte, etc. Descripción de los datos requeridos por los modelos, fuentes para su obtención.

7.3.2. Obtención de datos

En este apartado se indican las labores que se siguen para obtener todos los datos necesarios para completar el modelo conceptual del emplazamiento y delimitar el alcance de la contaminación. En los capítulos 9 y 10 se desarrollan con mayor detalle las técnicas disponibles para la exploración del medio físico y la obtención de muestras en los diferentes medios, así como las técnicas para el análisis de los diferentes contaminantes que puedan estar presentes en el emplazamiento.

Programa de muestreo y análisis

Para establecer un programa de muestreo y análisis se debe consultar el capítulo 8 en el que se incluyen los aspectos y criterios específicos para llevar a cabo estas tareas.

En general hay que indicar que el muestreo deberá ir enfocado a alcanzar un conocimiento lo más exhaustivo posible de las zonas afectadas, sus dimensiones (tanto horizontal como verticalmente), los medios afectados (zona saturada, no saturada), características físicas del suelo y distribución de concentraciones para cada contaminante de interés.

En general puede seguirse el mismo criterio de zonificación planteado en el capítulo 8, distinguiéndose en este sentido los siguientes casos:

1. Zonas sin indicios de afección
2. Zonas con indicios de afección y localización conocida
3. Zonas con indicios de afección y localización de los focos desconocida

En cada uno de estos casos se seguirá una estrategia diferente y un número y distribución de puntos de muestreo ajustado a cada una de las situaciones.

Zonas sin indicios de afección

Puede tratarse de zonas del emplazamiento en las que la información de partida, siendo suficiente, indique la inexistencia de afección significativa. En estos casos podrá estar justificado no tomar muestras.

En determinados casos puede ser necesario confirmar la inexistencia de afección, bien porque la información de partida sea insuficiente, bien porque la situación haya cambiado o los objetivos finales del estudio así lo requieran. En esos casos sí se establecerá un programa de muestreo.

Zonas con indicios de afección y localización conocida

En estas zonas la estrategia deberá dirigirse a la delimitación de cada una de las fuentes de afección identificadas.

Para ello se establecerá la localización de los puntos de muestreo atendiendo a la distribución hipotética de los contaminantes. A modo de referencia puede considerarse la distribución de los puntos de muestreo con una separación máxima entre puntos de 5-10 m, en función del tamaño de la fuente. Hay que tener en cuenta en el diseño del muestreo que han de identificarse, en la medida de lo posible, los límites de la zona afectada (tanto horizontal como verticalmente).

En el caso de presencia de depósitos enterrados e hidrogeología local de interés, debe considerarse la necesidad de muestrear aguas arriba y aguas abajo de los mismos. El patrón de muestreo, si se tiene en cuenta la distribución habitual de los contaminantes en estos casos, se ajustará a la pluma hipotética de contaminación, considerando el espaciado entre puntos que más se adecue al caso concreto.

Zonas con indicios de afección y localización desconocida

Al igual que se ha indicado en el capítulo correspondiente a la Investigación Preliminar, puede darse el caso de que existan zonas del emplazamiento en las que haya indicios de afección pero no se conozca la localización del/los focos. En estos casos debe procederse de igual modo a como se señalaba en dicho capítulo: en primer lugar se recabará mayor información relativa a dicha afección por medio de entrevistas a personas que puedan conocer la historia del emplazamiento, revisiones bibliográficas u otras fuentes de información, para después planificar el muestreo.

La planificación del muestreo se enfocará en función de esta nueva información y teniendo en cuenta los objetivos finales del estudio. En el caso en que se hay podido localizar el foco potencial de afección, se procederá como en las zonas con indicios de afección y localización conocida. Si este caso no se diera, deberá programarse un muestreo de tipo barrido para localizar el foco de la afección.

Selección de las técnicas de muestreo

La selección de las técnicas de muestreo y estudio del medio físico se ajustará a los objetivos perseguidos por el estudio. Los criterios para su selección, así como las diferentes técnicas disponibles, se indican en el capítulo 9.

Medidas de seguridad e higiene para los trabajos de campo

Antes de proceder a la realización de los trabajos de campo deberán tomarse las precauciones oportunas para la protección de la salud y seguridad tanto del equipo de investigación que vaya a participar en las labores de investigación de la calidad del suelo, como de las personas del entorno que pudieran verse afectadas por los mismos.

Para ello, todo trabajo de investigación de la contaminación del suelo deberá, en primer lugar, evaluar los riesgos potenciales a los que se verán sometidos los trabajadores o personas del entorno. Se tendrán en cuenta tanto los riesgos de tipo químico o biológico (exposición a contaminantes tóxicos o cancerígenos y a organismos patógenos que pudieran estar presentes en la zona de estudio), como los de tipo físico o mecánico (riesgo de caídas, golpes, etc.) que puedan existir como consecuencia del desarrollo de los trabajos en cualquiera de sus fases (desde la simple visita al emplazamiento, hasta la manipulación de equipos o maquinaria pesada).

Una vez evaluados los riesgos potenciales para la salud del equipo de trabajo y personas del entorno, se considerarán las medidas oportunas para la prevención de los mismos, atendiendo a la normativa existente al respecto (Ley de Prevención de Riesgos Laborales, Disposiciones mínimas de seguridad y salud en obras de construcción, UNE-EN ISO 10381-3, *Guidance on safety*).

7.3.3. Definición del modelo conceptual

La definición del modelo conceptual que servirá para la elaboración del Análisis de Riesgos, incluirá los siguientes trabajos de investigación:

- Caracterización del medio físico: descripción de aquellos aspectos geológicos e hidrogeológicos que se consideren de interés.
- Alcance de la afección: identificación de los focos causantes de la afección, delimitación de las áreas y medios afectados, así como caracterización de los mecanismos de movilización de los contaminantes.
- Vulnerabilidad del medio: identificación de los potenciales receptores, poblaciones expuestas y vías de exposición a los distintos contaminantes. En este sentido, el desarrollo de los aspectos específicos relativos a receptores potenciales y vías de exposición deberá tratarse en mayor detalle durante el Análisis de Riesgos (ver guía de Análisis de Riesgos).

Caracterización del medio físico

Dentro de los elementos del medio físico necesarios para la elaboración del Modelo Conceptual, la caracterización hidrogeológica de la zona de estudio reviste una especial importancia, habida cuenta del interés del recurso, tanto desde el punto de vista de potenciales receptores (usuarios de las mismas, relaciones con aguas superficiales, etc.) como desde el punto de vista de la movilización de contaminantes a través de ellas. Su estudio deberá abarcar la zona saturada y la no saturada.

Se evaluará la necesidad de recurrir a métodos geofísicos y de exploración hidrogeológica clásica, según se recoge en el capítulo 9, cuyos resultados servirán para la interpretación geológica del sistema. Para obtener información acerca de las características hidrogeológicas como son: tipo de acuífero (acuífero libre, confinado, acuitardo), dirección de flujo y parámetros hidrogeológicos, se utilizarán técnicas de: a) medidas del nivel piezométrico en diferentes puntos de control, b) ensayos sobre el acuífero (ensayos de bombeo,

de descenso-recuperación y/o ensayos específicos para medios de baja permeabilidad) y c) ensayos en laboratorio para determinar propiedades de los materiales.

Los acuíferos superficiales constituyen generalmente recursos importantes de aguas subterráneas, siendo además los más vulnerables a la contaminación. Los diferentes contaminantes pueden llegar hasta el agua subterránea a través de alguna de las siguientes vías: 1) recarga artificial o fugas desde tuberías; 2) infiltración de la precipitación o retornos de riego en la zona no saturada; 3) recarga inducida desde cursos de agua superficial o lagos u otras aguas superficiales; 4) recarga a través de los límites con otras formaciones y 5) lixiviación o derrames desde vertederos, industrias y otros.

La movilización de contaminantes desde el agua subterránea puede producirse como consecuencia de los siguientes procesos: 1) lixiviación desde la zona saturada hacia otros estratos, 2) extracción por bombeo y drenaje, 3) movilización a ríos y lagos y 4) descarga en manantiales.

Para poder entender el comportamiento del sistema hay que obtener una serie de datos que incluyen la descripción del emplazamiento (geometría del acuífero), propiedades de transmisividad y capacidad de almacenamiento e información acerca del recurso, presencia de pozos, usos, etc. La información no registrada en bibliografía deberá obtenerse a partir de la elaboración de un programa de toma de datos en campo.

Durante la Investigación Detallada, deben considerarse aquellos aspectos de carácter específico que sirvan para abordar situaciones complejas. En el cuadro 7.2 se recogen todos los datos que se consideran de interés para la predicción de la movilización de contaminantes a través del agua subterránea.

Cuadro 7.2	
Datos de interés para la predicción de la movilización a través del agua subterránea	
I. Cartografía y propiedades hidrogeológicas	
1. Mapa hidrogeológico en el que se indique la extensión y límites del acuífero/s.	
2. Mapa topográfico con indicación de los cursos de agua superficial.	
3. Mapa piezométrico, perfiles litoestratigráficos, espesores saturados.	
4. Transmisividad, conductividad hidráulica y características de la base del acuífero.	
5. Coeficientes de almacenamiento.	
II. Funcionamiento hidráulico del sistema	
1. Tipo y extensión de zonas de recarga (áreas de riego, cuencas, pozos de recarga, derrames, fugas en tanques, etc.).	
2. Relación entre aguas superficiales y subterráneas (conexiones hidráulicas).	
3. Bombeos de aguas subterráneas (distribución en el tiempo y en el espacio).	
4. Caudales de cursos de aguas superficiales (distribución en el tiempo y en el espacio).	
5. Precipitación y evapotranspiración.	
III. Respuestas observables	
1. Variación piezométrica en el tiempo y espacio.	
IV. Otros factores a tener en cuenta	
1. Información económica acerca de la distribución del agua.	
2. Normativa existente.	
3. Factores medioambientales.	
4. Planificación futura en cuanto al uso del agua y de los suelos.	

En el caso específico del estudio de la zona no saturada, deberá obtenerse información acerca de los siguientes aspectos: a) espesor de la zona no saturada, b) litología, diferenciación entre materiales naturales y antrópicos, c) propiedades del medio (estructura, contenido en humedad, permeabilidad). Para ello se considerará la necesidad de utilizar equipos y técnicas de investigación específicas (uso de lisímetros, infiltrómetros, permeámetros, sondas, etc.).

De los aspectos de interés en el estudio de la zona no saturada, el muestreo del aire intersticial del suelo proporciona una información muy útil, en el caso de una contaminación por compuestos orgánicos volátiles. Las técnicas empleadas para su estudio se reco-

gen en el capítulo 9 y consisten, básicamente, en la introducción de sondas de medida en el suelo, provistas bien de sistemas para el muestreo del gas y su posterior análisis en laboratorio, bien en la extracción por bombeo del mismo y su análisis en campo por medio de equipos portátiles. Estos estudios pueden servir como etapa inicial de barrido para identificar zonas afectadas por contaminantes orgánicos y ubicación posterior de los puntos de muestreo para suelos o aguas subterráneas e incluso, en etapas posteriores, para la localización de los pozos para la extracción de gases del suelo durante tareas de descontaminación.

Alcance de la afección

Con todos los resultados obtenidos relativos a la calidad del suelo y las aguas subterráneas, se definirá el alcance de la afección, teniendo en cuenta los siguientes elementos, que deberán desarrollarse en función de cada caso particular:

- Foco/s y/o fuentes de la afección: identificación y caracterización del origen de la afección del suelo. Por ejemplo, depósitos enterrados con fugas, tuberías de distribución, vertidos incontrolados, almacenamiento inadecuado de residuos, etc.
- Distribución horizontal y vertical de los contaminantes en el suelo: identificación del tipo de contaminante presente, concentraciones, estado físico en que se encuentran y distribución en los diferentes medios. Concentraciones máximas y mínimas detectadas. Valoración del alcance de la afección teniendo en cuenta los Criterios Orientativos de la Calidad del Suelo (COCS).
- Comportamiento de los contaminantes en el medio: mecanismos de movilización esperados para cada contaminante que haya sido identificado en el medio. Evolución espacial y temporal. Previsión de la movilización futura (empleo de modelos matemáticos).

Vulnerabilidad del medio

En la evaluación de la vulnerabilidad del medio se tendrán en cuenta los aspectos específicos que se desarrollan en la *Guía de Análisis de Riesgos para la Salud Humana y los Ecosistemas* perteneciente a esta misma colección de Guías publicadas por la Comunidad de Madrid. En esta fase, la información recopilada servirá de base para iniciar la evaluación de riesgos, sin embargo, será tarea del Análisis de Riesgos propiamente dicho su desarrollo en función de cada caso concreto.

Los datos necesarios pueden agruparse del siguiente modo:

- Datos relacionados con los receptores potenciales: identificación de personas (adultos o niños) actualmente o potencialmente expuestas, recursos, áreas especialmente sensibles, etc. Características de dichas poblaciones (tiempo potencial de exposición, costumbres, localización dentro o fuera del emplazamiento, distancia a la fuente, etc.).
- Datos relacionados con la caracterización del foco o la fuente de la afección: comportamiento del sistema, aspectos toxicológicos de los contaminantes identificados, propiedades físico – químicas, consulta a bases de datos, etc.
- Datos relacionados con las vías de exposición y mecanismos de movilización de los contaminantes. Obtención de parámetros necesarios para el uso de modelos de transporte, medidas directas en diferentes medios de exposición de interés, etc.

7.4. Informe resumen

Una vez finalizada la etapa de elaboración del modelo conceptual del emplazamiento se procederá a la elaboración de un informe final en el que se incluyan todos los trabajos realizados, metodología empleada, resultados obtenidos, así como las conclusiones que se hayan alcanzado.

Este informe será completado con la información correspondiente al análisis de los riesgos asociada a la problemática del emplazamiento, de manera que queden justificadas las siguientes etapas en el proceso de gestión del suelo y se tenga un diagnóstico de la contaminación del mismo.

CAPÍTULO 8

8.1. Introducción

8.2. Definición de los objetivos de muestreo

8.3. Información de partida

8.4. Diseño de muestreo y toma de muestras

8.4.1. Distribución y número de puntos de muestreo

8.4.2. Profundidad de muestreo

8.4.3. Tipo de muestras

8.4.4. Métodos de muestreo

8.4.5. Conservación, almacenamiento y envasado, etiquetado y transporte de muestras de suelo y de aguas subterráneas

8.5. Medidas de seguridad y salud

PROGRAMA DE MUESTREO Y ANÁLISIS

8.1. Introducción

En este capítulo se indican los criterios generales y metodología aplicables en la planificación de las tareas de muestreo durante las labores de investigación de la calidad del suelo en cualquiera de sus fases. Para mayor información pueden consultarse la serie de normas para el muestreo de la calidad del suelo “*Soil quality-sampling*” recientemente publicadas (UNE-EN ISO 10381), así como otras referencias relativas a muestreo de suelos y aguas subterráneas recogidas en el capítulo 11 de esta guía.

Cualquier programa de muestreo tiene por objeto la obtención de muestras para la determinación de las propiedades físicas, químicas y/o biológicas del medio en estudio; en consecuencia, debe prestarse un especial interés en que las muestras sean lo más representativas posibles, y que no sufran cambios relevantes entre el momento de la toma y del análisis.

En el caso particular del muestreo de suelos hay que tener en cuenta, además, que se trata de un sistema multifase; los suelos contienen parte sólida constituida por material granular de origen natural (arcilla, limo, arena, grava) o de origen antrópico (residuos de diferente procedencia tales como plásticos, cerámicos, etc.), agua u otros líquidos, gases y organismos vivos. Las características físicas y químicas del suelo, así como la presencia de organismos vivos, van a influir en la transformación, retención y movimiento de los contaminantes a través del mismo. El contenido en arcilla, materia orgánica, la textura, permeabilidad, pH, Eh y capacidad de intercambio iónico influyen en la tasa de migración y en el estado en que se presentan los contaminantes involucrados.

Hay que indicar que una de las características clave del suelo es su extrema variabilidad. Los suelos no son un medio isótropo sino fuertemente anisótropo tanto horizontal como verticalmente; es conocido que las propiedades del suelo no sólo varían de un punto a otro, sino también verticalmente en un perfil determinado.

En conclusión puede decirse que la obtención de datos representativos de la calidad del suelo de un emplazamiento va a estar condicionada por la correcta planificación del programa de muestreo.

En este sentido, los aspectos o factores clave a tener en cuenta para planificar correctamente los trabajos de prospección, muestreo y análisis a realizar son los siguientes:

- Definición del área a investigar y del objetivo final de la investigación: determinar si se trata de la Investigación Preliminar de un emplazamiento, del establecimiento del Blanco de la Situación Preoperacional o de una Investigación Detallada. Si ésta se plantea con el fin de obtener información inicial del emplazamiento o si se pretende, por ejemplo, caracterizar con detalle una posible pluma de contaminación de las aguas subterráneas.

- Identificar cuáles son los medios de interés: si lo que se pretende muestrear son suelos superficiales, subsuperficiales, aguas subterráneas, aguas superficiales, residuos o el aire intersticial del suelo.
- Definir cuáles son los parámetros de interés: cuáles son los parámetros o características del medio que se pretenden investigar: propiedades físicas, calidad química de los diferentes medios, sustancias químicas involucradas, etc.

Las tareas o etapas que han de considerarse se resumen a continuación y se desarrollan en los siguientes apartados:

1. Definición de los objetivos del muestreo.
2. Información de partida.
3. Diseño del muestreo y toma de muestras.
4. Medidas de seguridad y salud.

8.2. Definición de los objetivos del muestreo

Antes de proceder a la planificación del programa de muestreo deben establecerse los objetivos que se persiguen: qué se pretende conocer y con qué grado de detalle y precisión.

En este sentido, se planteará de diferente modo un programa de muestreo para alcanzar los objetivos de una Investigación Preliminar en el caso del establecimiento de un Blanco de la Situación Preoperacional, que en una Caracterización Detallada donde será preciso determinar el alcance de una posible pluma de contaminación en las aguas subterráneas para un posterior Análisis de Riesgos para la salud de las personas y los ecosistemas.

8.3. Información de partida

La planificación del muestreo debe basarse en la información de partida existente, fijándose tanto en aquellos aspectos que ayuden a que el muestreo sea lo más representativo posible de la situación real, como en aquellos otros que puedan condicionar una eficaz toma de las muestras (por ejemplo, accesibilidad a los puntos de muestreo, localización de zonas potencialmente contaminadas, etc.).

8.4. Diseño de muestreo y toma de muestras

El diseño de muestreo incluye:

- a) Distribución de los puntos de muestreo.
- b) Selección del número de puntos de muestreo.
- c) Definición de la profundidad del muestreo.
- d) Determinación del tipo de muestras.
- e) Selección de los métodos de muestreo.
- f) Conservación, envasado y etiquetado de muestras.

Antes del inicio del muestreo propiamente dicho, deberá establecerse el protocolo de muestreo que se va a seguir.

Cuadro 8.1
Condiciones a tener en cuenta durante el diseño de muestreo

General

- Objetivos del muestreo (por ejemplo: identificación de áreas del emplazamiento con afección, determinación de niveles de fondo en la parcela, delimitación de zonas afectadas, etc.).
- Elementos propios del emplazamiento que pueden condicionar el diseño del muestreo (presencia de depósitos enterrados, zonas de almacenamiento de residuos, puntos de vertido, etc.).
- Superficie total de la parcela en estudio.

Características del medio físico

- Presencia de agua subterránea.
- Aspectos geológicos, topográficos y de accesibilidad.

8.4.1. Distribución y número de puntos de muestreo

La distribución y selección del número de puntos de muestreo debe basarse en la hipótesis de distribución espacial de la contaminación potencial en el emplazamiento, partiendo del modelo conceptual desarrollado durante las etapas de obtención de información preliminar, así como en los objetivos del estudio.

Una forma de abordar las primeras tareas del diseño de muestreo es la división del emplazamiento en áreas o estratos en función de la probabilidad de encontrar contaminación, identificando aquellas zonas que presenten una distribución similar en cuanto a dicha contaminación. Estas divisiones deben realizarse partiendo de la información preliminar: registros históricos, zonas de actividad industrial dentro del emplazamiento o datos previos de calidad del suelo.

De este modo podrán identificarse aquellas zonas en las que no se espere encontrar contaminantes; por ejemplo, zonas en las que se tiene constancia de que nunca fueron utilizadas con fines industriales dentro del emplazamiento, en contraposición con aquellas en las que sí exista constancia de una actividad potencialmente contaminante del suelo. Así, el esfuerzo del muestreo se centrará en aquellas zonas en las que haya mayor incertidumbre o mayor probabilidad de existencia de contaminantes y en las que la variabilidad en la distribución de la contaminación sea mayor.

En general, en cualquier emplazamiento podrán diferenciarse tres tipos de áreas:

- Zonas en las que no es probable que exista afección.
- Zonas en las que se sospeche que exista afección y ésta esté localizada. Localización conocida de la fuente de contaminación potencial (vertidos, pérdidas en depósitos enterrados, zonas de almacenamiento de residuos, etc.).
- Zonas en las que se sospeche que pueda existir afección pero no se conozca la localización precisa. Localización incierta de la fuente de contaminación potencial (antigua zona de enterramiento de residuos, zonas de procesos antiguos no ubicadas, etc.).

Una vez dividido el emplazamiento se deberá seleccionar el modelo de distribución de los puntos de muestreo que se vaya a utilizar.

En general existen dos tipos fundamentales de distribución espacial de los puntos de muestreo:

- a) en malla, en las que las muestras se toman de una matriz de cuadrados, rectángulos o triángulos, diseñada sobre la zona de estudio y
- b) por zonas o transectos, en las que las muestras se toman a intervalos a lo largo de una línea.

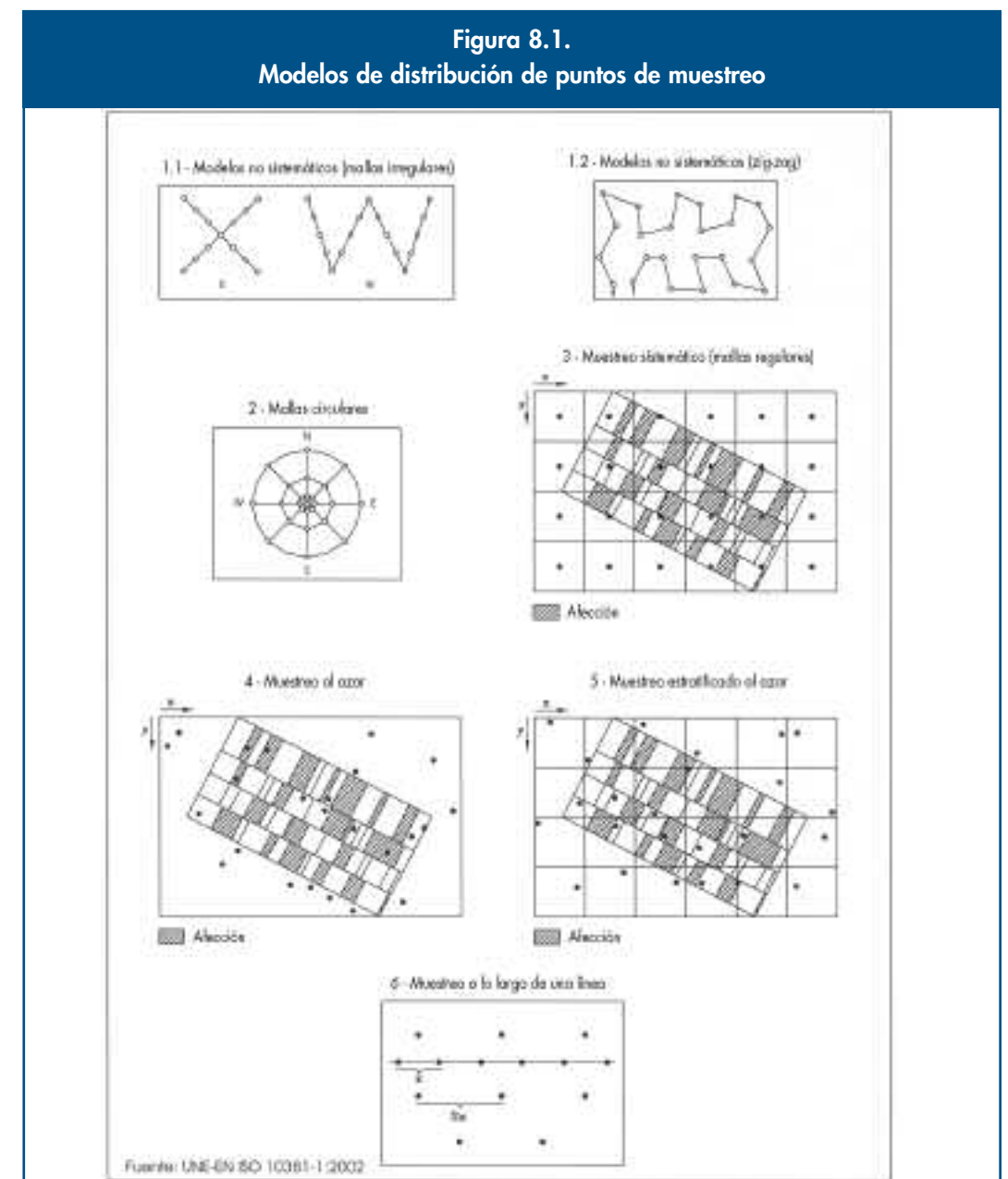
Las mallas obedecen a una hipótesis de distribución espacial de contaminación dispersa (por ejemplo, zonas amplias de vertido, contaminación difusa, etc.), mientras que la distribución por zonas o transectos responde a una dirección preferente de la distribución de la contaminación (contaminación del agua subterránea siguiendo la línea de flujo, etc.). Estos modelos de distribución pueden combinarse en un mismo emplazamiento lo que confiere una efectividad mayor a la toma de muestras.

En el caso particular de localización de piezómetros de control para el muestreo de aguas subterráneas, puede servir de ayuda la utilización previa de técnicas geofísicas para la delimitación de la extensión de la pluma de contaminación, y/o las técnicas de muestreo del aire intersticial del suelo (ver capítulo 9).

La tabla 8.1 recoge un resumen de los modelos de distribución espacial de muestreo para la caracterización de suelos. La figura 3 indica de manera esquemática los diferentes modelos de distribución de puntos de muestreo que pueden ser adoptados en el estudio de los suelos contaminados.

Tabla 8.1 Resumen de modelos de distribución de puntos de muestreo	
Tipos de modelo de muestreo	Descripción y aplicación
Modelos no sistemáticos (muestreo irregular)	Se basa en una distribución relativamente homogénea de los parámetros del suelo a evaluar. Se utiliza principalmente en el campo de la agricultura. La distribución de los puntos de muestreo siguen una forma de "N", "S", "W" o "X", tomándose un número de muestras puntuales a lo largo de dicha forma para luego mezclarla y obtener una muestra compuesta que será analizada. Este modelo de muestreo no es recomendable para la mayoría de los casos de investigación de suelos contaminados, ya que puede "esconder" en la mezcla, puntos con concentraciones de contaminantes elevadas. Aplicación: Estimación de distribución uniforme de sustancias.
Mallas circulares	Este modelo de muestreo puede ser útil para la caracterización de zonas contaminadas a partir de un foco como pueden ser depósitos enterrados. El muestreo se realiza siguiendo círculos concéntricos cuyo centro es el foco. Las muestras en este modelo deben ser puntuales. Este tipo de muestreo aporta información sobre concentraciones máximas, dimensión de los focos y fuentes de la contaminación y dimensión de la afección. Aplicación: Delimitación de una fuente conocida de contaminación.
Muestreo sistemático (mallas regulares)	Este modelo de muestreo se utiliza muy frecuentemente en estudios de contaminación de suelos, pero también es aplicable a otro tipo de investigaciones de suelos propios del campo de la agricultura. Consiste en la localización de los puntos de muestreo por medio de una malla cuyo espaciado dependerá del detalle requerido por los objetivos del estudio. Aplicación: Identificación y delimitación de fuentes de contaminación. Caracterización de la calidad del suelo de grandes superficies.
Muestreo al azar	Este modelo de muestreo se utiliza en aquellos casos de hipótesis de distribución irregular de la contaminación. En este caso los puntos de muestreo se localizan utilizando números al azar a partir de tablas o programas informáticos específicos. Aplicación: Raramente se utilizan en investigación de suelos.

Tabla 8.1 (continuación) Resumen de modelos de distribución de puntos de muestreo	
Tipos de modelo de muestreo	Descripción y aplicación
Muestreo estratificado al azar	Este modelo elimina alguna de las desventajas del muestreo al azar. Se trata de una combinación entre un muestreo sistemático con mallas y al azar. El emplazamiento se divide en un número de celdas, distribuyendo en cada una de ellas los puntos de muestreo al azar. Aplicación: Escasa en investigación de suelos.
Muestreo a lo largo de una línea	Este tipo de modelo puede utilizarse en aquellos casos en los que la distribución esperada de la contaminación sigue una línea, por ejemplo, por fugas desde una tubería. Aplicación: Distribución esperada de la contaminación en forma lineal.



El número de puntos de muestreo en cada emplazamiento estará condicionado tanto por la superficie a investigar como por el detalle requerido por la investigación.

Una vez definido el modelo de distribución de los puntos de muestreo, estos deben ser localizados en el emplazamiento. Su identificación debe ser inequívoca; asegurando de este modo que puedan visitarse si fuera necesario, permitiendo que la interpretación de la información que de cada punto se obtenga pueda plasmarse de forma gráfica (ej: modelizaciones, mapas, sistema de información geográfica) y que puedan planificarse trabajos posteriores relacionados con los mismos (ej: actuaciones de recuperación o planes de control y seguimiento medioambiental).

8.4.2. Profundidad de muestreo

La decisión sobre la profundidad del muestreo dependerá de las condiciones específicas del emplazamiento definidas en base a los objetivos del estudio y a la información de partida. En cualquier caso, aunque durante la planificación del muestreo se defina la profundidad a la que se tomarán las muestras, durante las fases de ejecución de los trabajos de campo ésta podrá modificarse en función de los resultados que se obtengan.

Es imprescindible registrar toda la información durante los trabajos de campo y en especial los siguientes aspectos:

- a) Presencia de cobertera vegetal o pavimentación: tipos, características, estado de conservación, espesor, etc.
- b) Características litológicas del perfil del suelo: tipo de materiales (contenido aparente en arcilla, limo, arenas, grava), cambios de litología (lateral y vertical), presencia de materiales de origen antrópico (restos de plásticos, residuos urbanos, etc.).
- c) Características organolépticas de interés: descripción de la coloración y aspecto de los materiales a lo largo del perfil del suelo (coloración natural, presencia de coloraciones extrañas) e identificación de olores indicativos de afección.
- d) Presencia de niveles de agua subterránea: tipo, características, aspectos organolépticos, profundidad, continuidad lateral, etc.
- e) Modificación de la topografía inicial: presencia de materiales de relleno, antiguos enterramientos de residuos, etc.
- f) Aspectos relacionados con la actividad potencialmente contaminante: presencia de tuberías de producción, saneamiento, depósitos enterrados, etc.

Debe quedar un registro claro en cada uno de los puntos de muestreo de la profundidad total alcanzada, espesor de las capas o niveles atravesados y la profundidad a la que se han obtenido las muestras.

8.4.3. Tipo de muestras

El diseño incluirá la definición del tipo de muestras que se tomarán en el emplazamiento, seleccionándose entre muestras puntuales y compuestas según los objetivos de la investigación.

Las muestras puntuales se tomarán en aquellos casos en los que interesa caracterizar la distribución espacial de los contaminantes. Por ejemplo, se tomarán muestras puntuales a lo largo del perfil atravesado cuando se quiera obtener información acerca de la distribución vertical de un contaminante determinado, o bien a lo largo de una determinada superficie cuando se pretendan identificar posibles zonas afectadas.

En aquellos casos en los que interese contar con datos relativos a la concentración media de uno o varios contaminantes deberán tomarse muestras compuestas. Por ejemplo, para determinar la concentración media de una capa o estrato en un perfil de suelo que vaya a ser excavado, o bien para el muestreo de acopios de suelos o residuos, las muestras compuestas se formarán a partir de la toma de n incrementos muestrales (es recomendable al menos 15 incrementos muestrales) No es recomendable tomar muestras compuestas cuando vayan a analizarse compuestos volátiles, puesto que el proceso de preparación de las mismas (homogeneización, triturado y mezcla) puede conllevar la pérdida parcial o total de los compuestos que se pretenden analizar.

En cualquiera de los casos la cantidad de muestra dependerá de los objetivos del muestreo. En general 500 gramos de muestra se consideran suficientes para la mayoría de las determinaciones analíticas a realizar en suelos. Para algunos análisis puede ser necesario obtener una cantidad mayor (ej: ensayos granulométricos), por lo que es recomendable consultar con el laboratorio que realizará la analítica correspondiente antes de iniciar los trabajos de campo.

En el caso de muestras líquidas, la cantidad requerida para el análisis dependerá de la metodología a emplear y de la precisión requerida. En general 1 litro suele ser suficiente para la mayoría de las determinaciones analíticas habituales, sin embargo, al igual que en el caso de los suelos, es siempre recomendable consultar la cantidad con el laboratorio de análisis.

8.4.4. Métodos de muestreo

El diseño de muestreo debe incluir la selección de las técnicas de muestreo que mejor respondan a los objetivos del estudio, teniendo en cuenta el medio que se pretende muestrear, la naturaleza de los contaminantes y las características particulares del emplazamiento (ej: presencia de pavimento, accesibilidad, etc.). En el capítulo 9 se recogen los métodos y técnicas más difundidos en los estudios de investigación de suelos.

8.4.5. Conservación, almacenamiento y envasado, etiquetado y transporte de muestras de suelo y de aguas subterráneas

Las muestras que se tomen en el emplazamiento y en particular de las aguas –tanto subterráneas, como superficiales–, son susceptibles de alterarse más o menos rápidamente como consecuencia de reacciones físicas, químicas o biológicas entre el momento de la toma de muestras y su análisis. Por ello es fundamental tomar precauciones antes y durante el transporte, así como durante el tiempo en el que las muestras estén almacenadas antes de su análisis.

En este apartado se recoge información general para la conservación de muestras. Para mayor información, puede consultarse el capítulo de referencias al final de la guía, en particular las normas UNE-EN ISO 10381 para el muestreo de suelos y la norma UNE-EN ISO 5667 para el muestreo de aguas.

La selección de unos métodos u otros dependerá de los contaminantes que vayan a ser analizados, los objetivos de la investigación y la precisión analítica requerida. El equipo de trabajo determinará el sistema de conservación de las muestras, las condiciones para preservar las características químicas, así como el tiempo máximo de almacenamiento.

En la tabla 8.2 se recoge un resumen de los principales tipos de envases utilizados en función de los contaminantes a analizar. La selección del envase es de gran importancia y debe asegurarse que la muestra no sufre modificaciones en su composición por adsorción, volatilización o contaminación por elementos externos. Otros factores que deben tomarse en consideración al elegir un envase u otro son su resistencia a temperaturas extremas, fragilidad, per-

meabilidad al agua o gases, facilidad de manipulación, tamaño, forma, peso, disponibilidad y posibilidad de reutilización.

En general no es común la aplicación de conservantes a muestras de suelo aunque sí a muestras líquidas en determinados casos. Los envases deben llenarse siempre de manera que exista el menor espacio libre posible, al objeto de evitar pérdidas por volatilización.

Es fundamental identificar convenientemente los recipientes que contengan las muestras. El rotulado debe ser claro y duradero para que no pueda sufrir modificaciones entre el momento de la toma de la muestra en campo y su recepción y análisis en laboratorio, con el fin de evitar errores derivados de una incorrecta identificación.

El etiquetado deberá incluir la anotación de aquellos detalles que permitan una adecuada interpretación de la información (fecha y hora del muestreo, lugar, proyecto, código de la muestra, nombre de la persona que ha efectuado el muestreo, naturaleza y cantidad de conservantes añadidos, etc.). La identificación de las muestras puede realizarse por medio de etiquetas, formularios, etc. Asimismo, deberán indicarse con claridad aquellas muestras que puedan contener sustancias peligrosas.

En el transporte hasta el laboratorio las muestras deben ser protegidas y selladas de manera que no se deterioren, pierdan su contenido o puedan verse contaminadas. Deben conservarse a una temperatura en torno a 5°C y protegerse de la luz.

8.5. Medidas de seguridad y salud

Una parte importante del programa de muestreo de suelos es la planificación y puesta en práctica de medidas de seguridad y salud adecuadas tanto para el equipo humano que realizará los trabajos de campo, como para las personas del entorno que puedan verse afectadas por los mismos.

Los elementos de riesgo se ven incrementados con respecto a otro tipo de estudios como consecuencia de la posible presencia de sustancias que pueden representar un peligro para la salud de las personas debido a sus características toxicológicas. Además, los emplazamientos abandonados o con escaso control (por ejemplo: industrias cerradas, vertederos incontrolados, etc.) pueden presentar riesgos de carácter físico debidos a la presencia de cavidades, materiales en combustión, materiales punzantes, etc.

Por ello, antes de realizar cualquier trabajo en un emplazamiento potencialmente contaminado deben considerarse todos aquellos aspectos relacionados con el riesgo para la salud y la seguridad de las personas. Una vez evaluados los riesgos, se procederá a definir las medidas preventivas que se tendrán en cuenta durante los trabajos de campo.

Debe consultarse la normativa existente relacionada con prevención de riesgos: Ley de Prevención de Riesgos Laborales (Ley 31/1995, de 8 de noviembre) y en concreto las disposiciones mínimas de seguridad y salud en obras de construcción (RD 1627/97, de 24 de octubre), así como otras normas de referencia (UNE-EN ISO 10381-3:2001).

La prevención debe incluir una serie de medidas que se resumen en los siguientes epígrafes:

- Evaluar los peligros que puedan estar presentes en el emplazamiento.
- Formación del personal.
- Elegir el método de muestreo más seguro.
- Proveer al personal de los equipos de protección y detección necesarios.
- Proveer al personal de las instalaciones y medios de higiene y primeros auxilios.
- Designación clara e inequívoca de la persona responsable del cumplimiento de las medidas de seguridad planificadas.
- Documentación de procedimientos de seguridad y emergencia.

Con la información previa con la que se cuente para la programación del muestreo se identificarán los riesgos que puedan presentarse.

Dependiendo de las circunstancias el equipo de trabajo se va a encontrar con diferentes tipos de peligros, los cuales podrán producir efectos de diversa índole; desde pequeñas irritaciones cutáneas o cortes hasta incluso la muerte. A la hora de evaluar los riesgos deberán considerarse tanto los peligros que puedan estar presentes como la probabilidad de que estos ocurran.

Los principales tipos de exposición a los que se podrá ver expuesto el equipo de trabajo son los siguientes:

- Exposición por contacto: contacto directo con contaminantes a través de la piel o las mucosas. Contaminantes como disolventes, benceno, fenoles, hidrocarburos, compuestos de Cromo VI y pesticidas pueden adsorberse a través de la piel o las mucosas, produciendo efectos tóxicos o cancerígenos para el hombre según cada caso. La adsorción de estos compuestos puede verse favorecida en caso de existir heridas, además de que, si éstas se producen, pueden provocar la entrada de otros agentes o microorganismos con las consiguientes infecciones u otros efectos patógenos (ej: tétano).

Material del envase	Toma de muestras de suelo contaminado					Contaminantes a analizar			
	Ácido	Alcali-no	Aceites y alquitranes	Disolven-tes	Gases	Inorgá-nicos	Aceites y alquitranes	Disolventes y comp. Orgánicos	Comp. volátiles
Bolsas de plástico	++	++	-	-	+	+a	-	-	-
Cubo de plástico	++	++	-	-	-	++b	-	-	-
Botes de vidrio de boca ancha (tapón de rosca)	++	-	++	++	-	++	++	-	-
Envases de aluminio (tapón de rosca)	-	-	++	++	-	++	++	+	+
Envases de PTFE o teflón®	++	++	++	++	++	++	++	++	++
Botes de aluminio de cierre hermético	-	-	++	++	-	++	++	+	+

- ++ Muy apropiado
- + Puede ser apropiado
- Inapropiado

Es aconsejable consultar previamente con el laboratorio encargado del análisis.

- a) No debe ser utilizado para suelos contaminados y muestras de investigación.
- b) No debe ser utilizado para suelos contaminados y muestras de investigación si se requiere analizar contaminación por compuestos orgánicos.

Fuente: Modificado de UNE-EN ISO 10381-2:2002

- **Exposición por ingestión:** aunque durante los trabajos de investigación de suelos es prácticamente imposible que se produzca la ingestión de suelos o aguas contaminadas de forma voluntaria, sí ha de considerarse el riesgo asociado a la ingestión accidental de pequeñas cantidades de suelo o agua si el muestreo se realiza sin contar con las preceptivas medidas de higiene tales como, por ejemplo, evitar comer, beber y fumar durante el muestreo.
- **Exposición por inhalación:** La vía respiratoria se considera una de las principales vías de entrada de contaminantes al organismo. Los efectos que puede producir sobre la salud la inhalación de contaminantes varían desde dolores de cabeza o mareos hasta la muerte, dependiendo del contaminante, su toxicidad y concentración en el punto de exposición. La exposición a contaminantes también puede producirse a través de la inhalación de polvo, fibras o humos.
- **Exposición a peligros físicos:** los peligros de tipo físico varían desde simples torceduras por un calzado inadecuado, hasta la fractura de huesos u otras heridas de mayor índole (por la presencia de maquinaria pesada, por ejemplo).
- **Exposición a riesgos eléctricos, fuego o explosión:** la presencia de gases inflamables o capaces de formar atmósferas explosivas o tóxicas debe ser identificada antes de acceder al punto de muestreo, utilizando, si fuera preciso, equipos de medida como explosímetros o detectores de gases tóxicos. De igual modo debe evaluarse el riesgo asociado a la presencia de servicios tales como líneas eléctricas de alta, media o baja tensión, conducciones de gas, etc., previendo su detección antes de proceder a los trabajos de campo.

En la tabla 8.3. se recogen algunas de las medidas de protección y equipos de medida comúnmente utilizados en investigación de suelos.

Tabla 8.3 Medidas de seguridad y salud para investigación de suelos		
Equipos de protección individual (EPI)	Instrumentos de medida	Procedimientos de seguridad
<ul style="list-style-type: none"> • Casco. • Botas de seguridad. • Guantes (a elegir según el contaminante presente). • Protectores auditivos. • Gafas de seguridad. • Máscaras y filtros (en función del contaminante presente). • Botiquín de primeros auxilios. • Extintor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Explosímetro. • Detectores automáticos de gases. • Tubos colorimétricos. • Detectores de servicios enterrados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Formación y adiestramiento. • Permisos de trabajo por parte del promotor. • Notificación a servicios de emergencia. • Teléfonos de contacto. • Instalaciones de descontaminación de equipos y personal. • Procedimiento para la toma de muestras.

Para mayor detalle puede consultarse la norma UNE-EN ISO 10381-3:2001 u otras normas relacionadas, cuyas referencias se recogen en el capítulo 11.

CAPÍTULO 9

9.1. Métodos no intrusivos

9.2. Técnicas de investigación de tipo intrusivo

9.3. Métodos de determinación de los parámetros hidráulicos

9.4. Métodos de muestreo de aguas subterráneas

9.5. Técnicas de muestreo y análisis in situ del gas del suelo

TÉCNICAS DE EXPLORACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

Una correcta caracterización del medio físico y de los contaminantes presentes en un emplazamiento precisa la utilización de una o varias técnicas de exploración.

Las técnicas existentes para la exploración de suelos que se indican y comparan a continuación incluyen tanto las utilizadas en el estudio de aspectos geológicos e hidrogeológicos, como las empleadas para la obtención de muestras de los distintos medios de interés (suelo, agua subterránea, gas intersticial).

La información sintetizada en este capítulo pretende servir como referencia en la selección de técnicas para la caracterización de los suelos contaminados, sin que se pretenda recopilar todos los sistemas existentes en el mercado. Será el equipo de investigación el que deba decidir cuál se empleará en cada caso concreto, en función de las particularidades de cada emplazamiento y teniendo en cuenta su disponibilidad.

En cualquier caso, y antes de proceder a la realización de trabajos de exploración en campo, el equipo deberá tener en cuenta, entre otros factores, los riesgos potenciales para la salud a los que se verán expuestos tanto los trabajadores como otras personas que puedan estar presentes en la zona, así como las instalaciones y medio ambiente próximo. En este sentido, deberán tomar las precauciones necesarias, teniendo en cuenta la normativa existente al respecto, según ha quedado recogido en el apartado 8.5.

Las técnicas de exploración pueden dividirse básicamente en los siguientes grupos:

- No intrusivas o indirectas.
- Intrusivas o directas.

9.1. Métodos no intrusivos

Las técnicas geofísicas son métodos indirectos de investigación que aprovechan las propiedades de los materiales, como densidad y resistividad eléctrica, para indicar cambios en las condiciones del suelo. Pueden ser empleados de manera muy eficaz para la exploración previa a la realización de sondeos con el fin de identificar zonas con anomalías o zonas prioritarias y, de esta manera, reducir el número de sondeos necesarios para la caracterización de un determinado emplazamiento.

La complejidad de estas técnicas requiere que la interpretación de los datos obtenidos sea realizada por técnicos especialistas experimentados.

En la tabla 9.1 se recogen los métodos geofísicos comúnmente utilizados en los estudios de caracterización de espacios potencialmente contaminados, indicándose las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

Tabla 9.1 Comparación de métodos geofísicos			
Método geofísico	Aplicación	Ventajas	Limitaciones
<p>SÍSMICOS</p> <p>Se basan en la variación en la transmisión de las ondas sísmicas en el subsuelo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Evaluación del agua subterránea como recurso. Perfil geotécnico. Perfil estratigráfico del subsuelo incluyendo la roca madre. Composición del suelo y de la roca. Ayuda en la localización de fracturas. 	<ul style="list-style-type: none"> Accesibilidad relativamente sencilla. Profundidad de penetración elevada dependiendo de la fuente de vibración. Cubre una amplia superficie en poco tiempo. Define capas estratigráficas proporcionando buenas estimaciones en cuanto a sus espesores. 	<ul style="list-style-type: none"> Sensible a ruidos y vibraciones externas. Dificultad de penetración en ambientes fríos. Interferencias con objetos metálicos. Los niveles litológicos de escasa potencia pasan inadvertidos. No se puede operar en periodo de lluvias.
<p>RESISTIVIDAD ELÉCTRICA</p> <p>Se basan en la variación de la resistividad eléctrica del subsuelo</p>	<ul style="list-style-type: none"> Estimación de la profundidad del agua subterránea. Perfil estratigráfico del subsuelo. Localización de lentejones arcillosos y vías preferentes de flujo. Evaluación del agua subterránea como recurso. Estudios de contaminación de agua subterránea, incluida la localización de LNAPL. Localización de zonas de fractura, karst y otras vías de movilización del agua subterránea. 	<ul style="list-style-type: none"> Profundidad de penetración elevada. Cubre una amplia superficie en poco tiempo. Se pueden obtener estimación de los resultados finales en campo. 	<ul style="list-style-type: none"> Susceptible a interferencias eléctricas tanto naturales como artificiales (menos que los electromagnéticos). Uso limitado en tiempo lluvioso. Utilidad limitada en zonas urbanizadas. Los electrodos deben estar en contacto directo con el suelo, lo que implica eliminar pavimento si existe. La interpretación asume un subsuelo con capas horizontales y homogéneas. La heterogeneidad lateral no es fácilmente identificada. La distancia entre electrodos debe ser de 4 a 5 veces la profundidad de investigación.
<p>GEORADAR <i>GPR – Ground Penetrating Radar</i></p> <p>Se basa en el uso de ondas electromagnéticas de alta frecuencia para proporcionar el perfil de objetos enterrados, estructura y litología.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Localización de objetos enterrados. Definición de la superficie de la roca madre y estructura. Definición de las características kársticas. Definición de estado de estructuras antrópicas. Definición de LNAPL (ocasionalmente). 	<ul style="list-style-type: none"> Gran cobertura de superficie. Elevada resolución vertical en terrenos adecuados. Visualización inmediata de los datos. Baja interferencia con objetos en superficie. 	<ul style="list-style-type: none"> Profundidad de penetración limitada (1 metro o menos en suelos arcillosos húmedos y hasta 25 metros en suelos secos y arenosos) Acceso limitado debido al volumen del equipamiento necesario. Interpretación cualitativa de los resultados. Uso limitado en tiempo lluvioso.

Fuentes: USEPA 1997b, 1991a

Tabla 9.1 (continuación) Comparación de métodos geofísicos			
Método geofísico	Aplicación	Ventajas	Limitaciones
<p>MAGNÉTICOS</p> <p>Detección de objetos metálicos enterrados por los campos magnéticos que generan.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Localización de objetos férricos enterrados. Detección de los límites de vertederos que contengan objetos ferrosos. Localización de rocas con hierro. 	<ul style="list-style-type: none"> Movilidad elevada. Obtención de la información en el campo. Rápido. 	<ul style="list-style-type: none"> La detección depende del tamaño y del contenido en hierro del objeto. Dificultades en zonas urbanizadas. Uso limitado en tiempo lluvioso. Interpretación de datos complicada en zonas con campos magnéticos naturales.

Fuentes: USEPA 1997b, 1991a

9.2. Técnicas de investigación de tipo intrusivo

Las técnicas de investigación de tipo intrusivo se utilizan fundamentalmente para la prospección geológica e hidrogeológica y para la toma de muestras de suelo, aguas subterráneas y gas intersticial.

La selección de la metodología de perforación a emplear dependerá de una serie de factores como el medio a muestrear, la accesibilidad de la zona, los requerimientos analíticos, etc.

Para la selección de las técnicas de prospección deberán tenerse en cuenta las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas. En este sentido, se considerarán los siguientes aspectos:

- Litología a atravesar. El sistema de perforación deberá ser adecuado para el tipo de materiales a atravesar, de manera que no suponga una limitación durante su ejecución.
- Profundidad a alcanzar. Los sistemas de perforación manuales y semimecánicos presentan una limitación evidente en este aspecto. En aquellos casos en los que se requiera alcanzar profundidades superiores a los 5 metros, deberán seleccionarse técnicas de perforación mecánica.
- Necesidad de fluidos para la perforación. Deberá tenerse en cuenta la posibilidad de alteraciones cuantitativas o cualitativas debidas al uso de estos fluidos. Por ello, siempre que sea posible, debería optarse por el uso de técnicas de perforación que no utilicen fluidos.
- Necesidad de obtener datos litológicos precisos. Evitar, siempre que sea posible, aquellas técnicas de perforación que no permiten la extracción de testigo.
- Necesidad de instalación de piezómetros o pozos de control. En caso de presencia de nivel/es de agua subterránea de interés, deberán seleccionarse las técnicas de exploración que posibiliten una correcta instalación tanto de la tubería piezométrica como del material filtrante.
- Accesibilidad a la zona. La selección del método de muestreo debe tener también en cuenta la presencia de límites de carácter físico, tales como pendientes excesivas, espacio reducido, interior de edificios o bajo techado, etc.

En la tabla 9.2. se recogen a modo de referencia algunos de los métodos de muestreo e investigación más difundidos, indicándose las ventajas e inconvenientes de los mismos en función del uso al que se destinen.

Método de prospección	Aplicación	Ventajas	Limitaciones
Calicatas (Pueden realizarse a mano o usando medios mecánicos, en función de cada caso).	<ul style="list-style-type: none"> Muestreo exhaustivo de grandes superficies en las que no se requiere una profundidad importante. 	<ul style="list-style-type: none"> Facilidad de acceso (en el caso de calicatas manuales). Rapidez de ejecución. Costes reducidos. Visión directa del medio atravesado. 	<ul style="list-style-type: none"> Profundidad limitada (hasta 4 m). No válido para medios consolidados. Dificultad de ejecución en zona saturada. Importante alteración de los puntos de muestreo.
Sondeos manuales (Existe una gran variedad de diseños en función del tipo de suelo y condiciones de muestreo).	<ul style="list-style-type: none"> Caracterización de suelos superficiales. 	<ul style="list-style-type: none"> Facilidad de acceso. Costes reducidos. Escasa alteración de los puntos de muestreo. 	<ul style="list-style-type: none"> Profundidad limitada (aproximadamente hasta 3 m). Limitado a suelos no consolidados.
Sondeos semimecánicos o ligeros (Sondeos a percusión con capacidad de extracción de testigo continuo).	<ul style="list-style-type: none"> Caracterización de suelos superficiales y subsuperficiales. 	<ul style="list-style-type: none"> Facilidad de acceso. Coste medio/reducido. Profundidad mayor que sondeos manuales. Escasa alteración de los puntos de muestreo. 	<ul style="list-style-type: none"> Profundidad limitada (aproximadamente hasta 4 m). Requiere personal cualificado. Limitado a suelos no consolidados o poco consolidados.
Sondeos mecánicos (Varios sistemas según los objetivos perseguidos).	<ul style="list-style-type: none"> Caracterización de suelos subsuperficiales y aguas subterráneas. 	<ul style="list-style-type: none"> Cualquier tipo de terreno. Permiten la instalación de piezómetros para el muestreo de aguas subterráneas. Sin limitación de profundidad. Escasa alteración de los puntos de muestreo. 	<ul style="list-style-type: none"> El emplazamiento debe ser accesible a maquinaria pesada. Coste elevado. Requiere personal especializado.
Sondas y penetrómetros (Varios sistemas según los objetivos perseguidos).	<ul style="list-style-type: none"> Detección y evaluación de la distribución de contaminantes. Métodos de barrido semicuantitativo y cuantitativos. 	<ul style="list-style-type: none"> Permite la toma de muestras de suelo, gas y agua subterránea. Permite determinaciones en campo (pH, redox, temperatura y test geofísicos). No se generan residuos durante la perforación. No altera el agua subterránea. Puede utilizarse con equipos de análisis <i>in situ</i> como láser de fluorescencia inducida para compuestos orgánicos. 	<ul style="list-style-type: none"> Elevados costes de desplazamiento. Recuperación pobre en el caso de materiales granulares no cohesivos. Profundidad de perforación limitada en determinadas litologías.

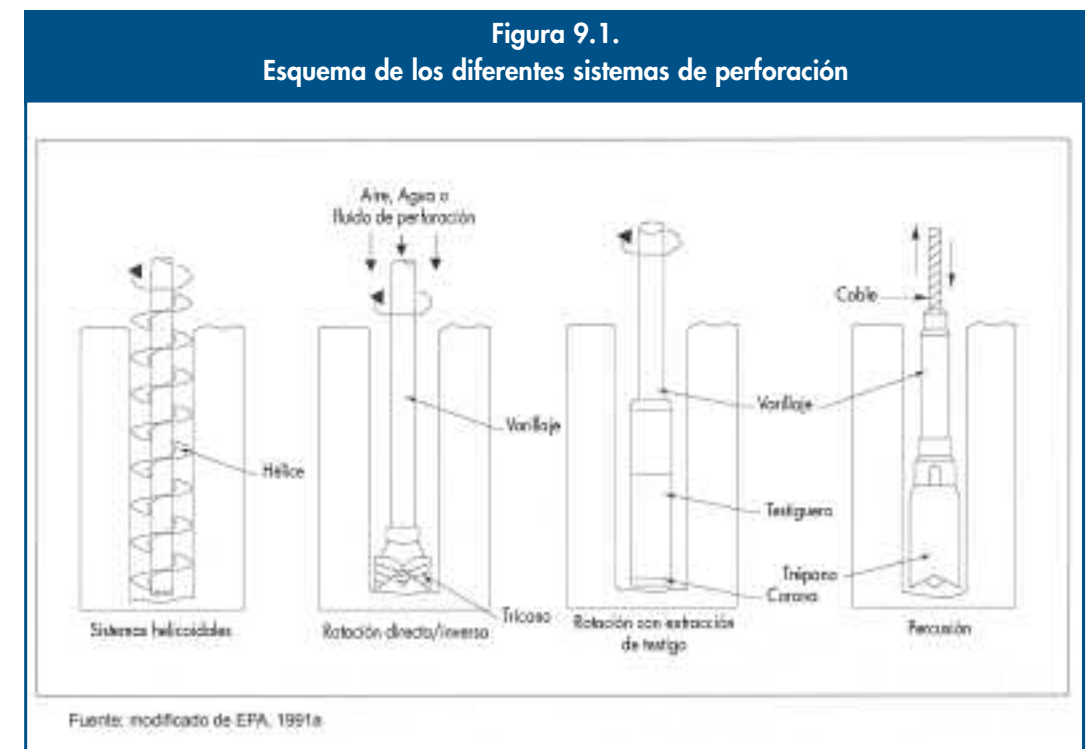
De IHOBE 1998d y BS 10175:2001

Además de estas técnicas, pueden utilizarse todas aquellas que el equipo de estudio estime adecuadas para la consecución de los objetivos.

Hay que indicar que las técnicas de perforación por medio de sondeos mecánicos constituyen un conjunto de herramientas que habrá que adaptar a las necesidades específicas del estudio. En general se utilizan cuando se precisa alcanzar profundidades que con otros métodos no sería posible alcanzar o bien, para la exploración de las aguas subterráneas. En la figura 9.1 se recogen los grandes grupos de sistemas de perforación utilizados en los estudios de suelos contaminados. En la tabla 9.3 se resumen las ventajas e inconvenientes del uso de los diferentes métodos.

Tipo	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 para la construcción de pozos hasta 30 m. Abandono del sondeo en caso de que aparezcan cantos gruesos.
Rotación	<ul style="list-style-type: none"> Método rápido y eficaz. Excelente para sondeos de gran y pequeño diámetro. Alcanza profundidades importantes. Puede ser utilizado 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 algunos casos 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/rotopercusión	<ul style="list-style-type: none"> No siempre requiere el uso de fluidos de perforación. Puede ser utilizado tanto en medios consolidados como no consolidados. Control litológico regular. Técnica adecuada en zonas de gravas. 	<ul style="list-style-type: none"> Ejecución lenta. No permite obtener testigo de perforación.

Modificado de USEPA, 1991a



En la tabla 9.4 se incluyen los métodos de perforación adecuados a los objetivos específicos de estudio.

Tabla 9.4
Tipos de perforación y objetivos de la investigación

Objetivo de perforación		Tipo de perforación				
		Percusión con cable	Auger (tornillo / cucharas)	Diamante	Rotación con aire	Doble tubo
Muestras alteradas	Arenas	Sobre nivel freático	*	*		*
		Bajo nivel freático	*	*		*
	Arcillas	Sobre nivel freático	*	*		*
		Bajo nivel freático	*	*		*
	Gravas, cantos rodados, arcillas		*			
Depósitos aluviales profundos conteniendo arenas, limos, arcillas y gravas		*				
Rellenos		*	*		*	*
Ensayos de formación <i>in situ</i>	Ensayos de penetración en suelos		*	*	*	*
	Ensayos de permeabilidad en roca				*	*
Muestras inalteradas de suelos de grano fino		*	*	*	*	*
Localización de niveles piezométricos		*	*		*	*
Localización de estrato duro		*	*	*	*	*
Identificación de rocas		*		*	*	*
Obtención de roca a una profundidad dada		*		*	*	*
Obtención de testigos de roca para examen				*		

Fuente: modificado de López Jimeno, 2000

Durante la toma de muestras, cualquiera que sea la técnica elegida, deben tomarse las precauciones necesarias para evitar la contaminación cruzada entre los diferentes puntos de muestreo. Para ello, debe limpiarse exhaustivamente, antes y después de cada toma de muestras, todo el varillaje o herramientas que vayan a ser utilizadas. No existen procedimientos únicos; sin embargo, la limpieza puede realizarse utilizando detergente, seguido de una secuencia de aclarado con agua y algún disolvente (por ejemplo metanol). Otra precaución a tener en cuenta es la planificación de la secuencia de los muestreos, de modo que se vaya desde los puntos menos contaminados hacia los más contaminados. Por último indicar que, antes de la toma de muestras, e independientemente de la técnica utilizada (sondeo, calicata, etc.), debe procederse a limpiar el punto de muestreo de cualquier elemento extraño que pueda provenir de niveles superiores.

Además de la toma de muestras, los sondeos o calicatas servirán para obtener información acerca de las características geológicas e hidrogeológicas del emplazamiento. Durante la ejecución de las perforaciones se registrará la secuencia de materiales atravesados incluyendo una descripción geológica, observaciones organolépticas, así como la profundidad de la toma de muestras y nivel de agua subterránea.

Para la construcción y muestreo de piezómetros de control o pozos existen numerosos tipos de materiales diferentes. En la construcción de piezómetros deben tenerse en cuenta criterios como la resistencia mecánica, la resistencia a la corrosión, los contaminantes esperados, la

capacidad de interferir en las mediciones analíticas que se vayan a llevar a cabo, la disponibilidad y los costes asociados. En este sentido los materiales más comúnmente utilizados son el PVC, polipropileno, polietileno, Teflon®, acero inoxidable o acero al carbono.

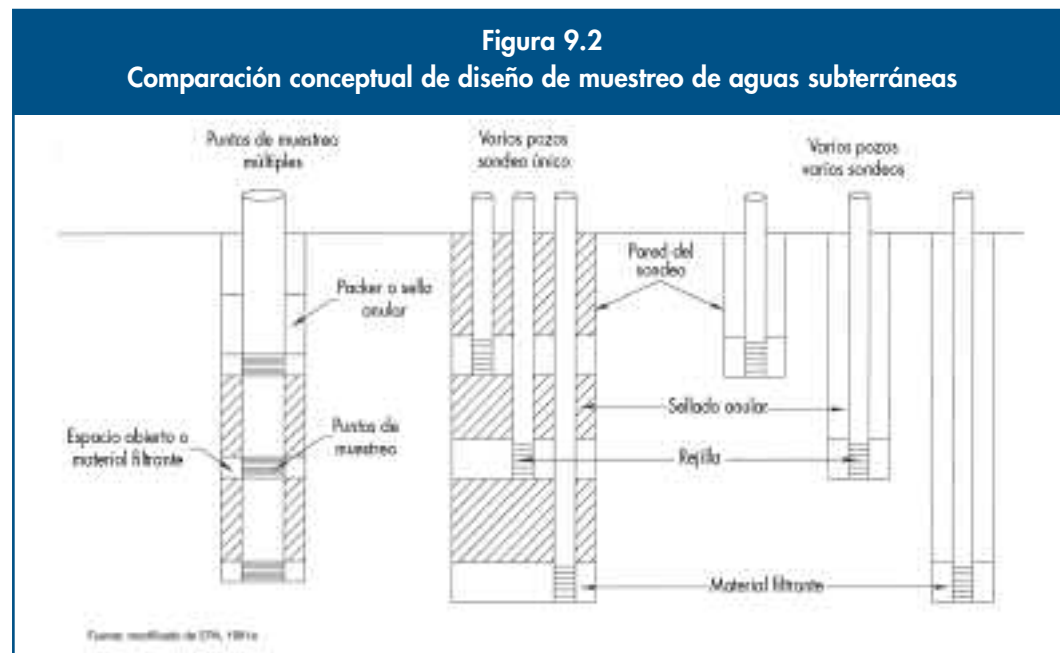
La tabla 9.5 recoge las ventajas e inconvenientes de cada uno de los diferentes materiales.

Tabla 9.5
Comparación entre materiales para la construcción de piezómetros.

Tipo	Ventajas	Inconvenientes
Politetrafluoroetileno (PTFE) o Teflon®	<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.
Hierro o acero al carbono	<ul style="list-style-type: none"> Alta resistencia mecánica. 	<ul style="list-style-type: none"> Se corroe con facilidad, proporcionando superficies de gran sorción para metales. Se deteriora en medios corrosivos.
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.

Modificado de USEPA, 1991a

Existen diversas formas de instalar piezómetros de control de las aguas subterráneas. En la figura 9.2 se muestran las tres categorías básicas. Durante la caracterización del emplazamiento deberá seleccionarse la que mejor se adapte al mismo.



Una vez instalado, cada piezómetro deberá ser desarrollado para eliminar todos aquellos elementos ajenos a la propia naturaleza del medio a estudiar. Existe un gran número de técnicas para el desarrollo de piezómetros, que utilizan herramientas como el cuchareo, *air lift* (elevación por aire), *bailers* o bombas. Para el desarrollo de los piezómetros ha de evitarse la introducción de agua que no sea de la propia formación. La extracción debe mantenerse hasta que se aprecie la ausencia de finos en el agua y la estabilización de parámetros como pH y conductividad.

9.3. Métodos de determinación de los parámetros hidráulicos

La caracterización hidrogeológica debe incluir la obtención de los parámetros característicos del acuífero de interés: gradiente hidráulico, permeabilidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, etc. Estos datos se consideran básicos para la comprensión del funcionamiento del sistema y determinantes a la hora de seleccionar las técnicas de descontaminación más adecuadas, en caso necesario.

En la tabla 9.6 se incluye un resumen de los métodos utilizados para la medición o estimación de los parámetros hidrogeológicos de interés en una investigación de suelos.

Tabla 9.6 Resumen de métodos para la obtención de parámetros hidráulicos		
Método	Parámetros	Descripción
Análisis granulométrico	k, m	Estimación de la conductividad hidráulica y otras características del suelo a partir de una muestra representativa del nivel litológico de interés. El análisis granulométrico debe incluir tanto el empleo de técnicas de tamizado como de análisis de la velocidad de sedimentación, para asegurar que se evalúan todas las granulometrías existentes en la muestra.
Ensayos de bombeo	T, S, R, k, m _e	Medición de la evolución de los niveles de agua tanto en el pozo de bombeo como en otros pozos cercanos o piezómetros de observación, cuando los hubiera.

T = Transmisividad, S = Coeficiente de almacenamiento, k = Conductividad hidráulica o permeabilidad, m = Porosidad, m_e = Porosidad eficaz, R = Radio de influencia del bombeo, i = Gradiente hidráulico

Tabla 9.6 (continuación) Resumen de métodos para la obtención de parámetros hidráulicos		
Método	Parámetros	Descripción
Ensayos de descenso y recuperación	T, k	Ensayos de corta duración que consisten en la introducción o extracción de agua en cantidades pequeñas, para, observando la evolución de los niveles de agua con el tiempo, calcular la conductividad hidráulica del medio.
Métodos de trazadores	T, k	Basados en la medición directa de la velocidad real del agua subterránea, si se conoce el gradiente hidráulico y la porosidad, puede calcularse la permeabilidad del acuífero en el área de estudio.
Ensayos de laboratorio	k	Cálculo de la permeabilidad aplicando la ley de Darcy a un cilindro del material a ensayar. El ensayo se realiza con permeámetros de carga fija o de carga variable, según el rango de permeabilidad a medir. Obtiene un valor máximo. El valor puede no representar aspectos como fracturas, macroporos y otras heterogeneidades del material geológico.
Superficies piezométricas	i	Representación gráfica de la altura piezométrica del agua subterránea, a partir de la cual puede calcularse el gradiente hidráulico en la zona de estudio. Esta información es válida, además, para conocer el comportamiento del agua subterránea.

T = Transmisividad, S = Coeficiente de almacenamiento, k = Conductividad hidráulica o permeabilidad, m = Porosidad, m_e = Porosidad eficaz, R = Radio de influencia del bombeo, i = Gradiente hidráulico

9.4. Métodos de muestreo de aguas subterráneas

En el caso del muestreo de piezómetros o pozos de control, la toma de muestras de agua subterránea deberá realizarse una vez desarrollado el piezómetro o pozo correspondiente, de forma que se evite la presencia de elementos extraños procedentes de la etapa de construcción. En general puede tomarse como referencia el muestreo una vez transcurridas al menos 72 horas desde el desarrollo del piezómetro.

Antes del muestreo deberá medirse el nivel piezométrico, tomándose nota de la presencia o ausencia de fase libre sobrenadante (LNAPL), y la profundidad total del piezómetro. Estos datos, junto con la medida del diámetro de la entubación, servirán para determinar el volumen de agua dentro del piezómetro.

El pozo se purgará antes de cada muestreo, extrayéndose como mínimo tres veces el volumen de agua subterránea contenida.

La purga de los pozos puede realizarse tanto con bombas sumergibles como con toma-muestras tipo *bailer*. En aquellos medios de baja permeabilidad, en los que prácticamente se seca el piezómetro durante la purga, se dejará recuperar parcialmente el nivel y se procederá entonces a la toma de la muestra.

El agua purgada de los pozos deberá ser adecuadamente almacenada y gestionada dado que puede estar contaminada.

De cara a evitar contaminación cruzada entre los diferentes puntos de muestreo de agua, deberán utilizarse elementos desechables o bien proceder a la limpieza exhaustiva del material entre un punto y otro de muestreo. El método de limpieza puede consistir en la aplicación de agua con detergente, seguido de un enjuague con agua destilada y metanol, finalizando con un último enjuague con agua destilada. El efluente generado durante el proceso de limpieza debe ser almacenado y gestionado como corresponda a sus características.

En el caso del muestreo del agua subterránea existe una gran variedad de instrumentos que pueden utilizarse en función de los parámetros que se vayan a analizar (presencia de compuestos volátiles o no), características constructivas de los piezómetros, accesibilidad, profundidad, etc. Entre los métodos más utilizados destacan las bombas (centrífugas, neumáticas, peristálticas, eléctricas) y los distintos tipos de *bailer* (tomamuestra de válvula o bola).

Existen numerosos estudios acerca de la capacidad de muestreo de compuestos orgánicos volátiles con diferentes equipos. Los mejores equipos identificados para este tipo de muestreo, según los datos disponibles, son la bomba de pistón, las bombas eléctricas sumergibles y las bombas peristálticas. Los *bailer* son los que peores resultados dan, debido probablemente a la agitación de la muestra durante su traslado a la botella. Sin embargo, hay que tener en cuenta que un operador especializado en este tipo de muestreos puede minimizar mucho estos problemas.

Durante el muestreo de las aguas subterráneas deben desecharse los primeros 100 ml de agua para evitar el efecto filtro y el contacto con el aire durante los primeros momentos del bombeo.

La selección de los envases y los métodos para la conservación de las muestras deberán tener en cuenta aspectos como: medio muestreado, parámetro a analizar, otros requerimientos (ver capítulo 8 de esta guía). Las muestras de agua se filtrarán durante el muestreo, cuando sea preciso, mediante filtros desechables de 0,45 μm , conectados a la bomba a través de tubos de silicona.

En caso de que exista una capa de LNAPL sobre el nivel piezométrico, se procederá a su muestreo antes del purgado del piezómetro.

9.5. Técnicas de muestreo y análisis in situ del gas del suelo

Las técnicas de muestreo y análisis del aire intersticial del suelo son muy útiles para la localización de áreas contaminadas por Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) que afecten a la zona no saturada, así como por contaminantes que los generen (LNAPL). Se basan en la realización de pequeñas perforaciones a escasa profundidad y a la introducción de tubitos en el suelo para la toma de un volumen del gas intersticial. Éste puede ser analizado en el propio emplazamiento o en laboratorio.

La efectividad de esta técnica depende de la litología del terreno y de la permeabilidad de la zona no saturada.

Las zonas en las que se detecte una concentración mayor de COVs serán las que más próximas se encuentren a la fuente. Por ello, este tipo de técnicas pueden ser muy útiles como guía a la hora de determinar la localización óptima de pozos de extracción de gases del suelo en etapas posteriores.

La descripción de estas técnicas y su aplicabilidad se recoge con mayor detalle en el capítulo 10.

TÉCNICAS Y MÉTODOS ANALÍTICOS

Un aspecto fundamental en el desarrollo de los trabajos de investigación (preliminar y detallada) de emplazamientos contaminados, es el conocimiento de los diferentes parámetros del suelo mediante la aplicación de técnicas de análisis. Los parámetros a conocer pueden ser, tanto los contaminantes procedentes de la actividad desarrollada en la zona de estudio (compuestos orgánicos, metales pesados, etc.), como aquellos que definen las propiedades físicas y químicas del medio (cationes y aniones, contenido en materia orgánica, etc.) y cuyo conocimiento es también imprescindible para abordar correctamente la problemática del emplazamiento. En este capítulo se recoge información de interés para abordar la selección de la tecnología e instrumentación analítica más apropiada para identificar y cuantificar los contaminantes más habituales en los estudios de investigación de la calidad del suelo.

En la mayor parte de los casos, la determinación de estos parámetros de interés se lleva a cabo en laboratorio. Sin embargo, en las últimas décadas se han desarrollado diferentes equipos para el análisis en campo que reducen el tiempo de obtención de resultados o permiten decidir las muestras que serán posteriormente enviadas a analizar en laboratorio, consiguiendo con ello una reducción de los costes asociados a las determinaciones analíticas.

En primer lugar y antes de proceder a la descripción de las diferentes técnicas analíticas, cabe señalar que la decisión de incluir unos contaminantes u otros en el programa analítico del estudio de investigación y por tanto la selección de la técnica de análisis más adecuada, dependerá de los objetivos de la investigación, de la historia de la actividad y del modelo conceptual que del emplazamiento se tenga. En la tabla 10.1 se incluye, a modo de ejemplo, un resumen de los principales contaminantes que pueden estar presentes en un emplazamiento en función de la actividad desarrollada. La tabla pretende servir como referencia y no ser un listado exhaustivo de los contaminantes que puedan aparecer.

Sector industrial	Tipo de actividad	Contaminantes esperados
Petróleo y Petroquímica	<ul style="list-style-type: none"> • Refino de petróleo. • Producción de gas. • Instalaciones de distribución de combustible. • Instalaciones de productos asfálticos. • Producción de plásticos. 	Hidrocarburos (BTEX, PAH, EOX, etc.).
Producción y transformación de metales	<ul style="list-style-type: none"> • Fabricación de acero. • Fabricación de metales ferrosos. • Fabricación de metales no ferrosos. • Tratamiento de superficies. 	Metales: Cu, Cd, Cr, Ni, Zn, Pb, As, Hg, etc. Cianuros. Hidrocarburos.

Tabla 10.1 (continuación) Principales contaminantes en función de la actividad industrial		
Sector industrial	Tipo de actividad	Contaminantes esperados
Industria Química	<ul style="list-style-type: none"> Fabricación de productos químicos orgánicos de base. Fabricación de productos químicos inorgánicos de base. Fabricación de fertilizantes. Fabricación de productos de base fitosanitarios y biocidas. Fabricación de medicamentos de base. Fabricación de explosivos. 	Metales: As, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, Pb, Hg Fenoles, sulfatos. Hidrocarburos: BTEX, EOX.
Minería	<ul style="list-style-type: none"> Extracción de minerales. Zonas asociadas a producción (talleres, almacenamiento de combustibles, etc.). 	Metales: Cu, Zn, Pb, As, etc. Hidrocarburos.
Gestión de residuos	<ul style="list-style-type: none"> Instalaciones para la valoración de residuos peligrosos, aceites usados. Instalaciones para la incineración de residuos municipales. Vertederos de todo tipo de residuos. Instalaciones para la eliminación de residuos no peligrosos. 	Hidrocarburos: Aceites minerales, PAH, BTEX, EOX, etc. PCBs. Metales: As, Cu, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn, Hg.
Industria textil y cuero	<ul style="list-style-type: none"> Tratamiento previo o tinte de fibras. Curtidos. 	Cromo VI. Hidrocarburos.

Para cada uno de estos contaminantes o familias de contaminantes existen diferentes técnicas analíticas aplicables. Estas tecnologías pueden ser utilizadas tanto durante las labores de caracterización de la contaminación de suelos y aguas subterráneas, como durante los trabajos de control y seguimiento de la descontaminación o recuperación, así como para confirmar si se han alcanzado o no los objetivos de recuperación del emplazamiento.

En función de los objetivos planteados puede ser interesante realizar un barrido inicial por grupos de contaminantes para identificar aquellos compuestos o grupos de compuestos que están presentes en el emplazamiento. Estos análisis en algunos casos pueden realizarse en campo por medio de equipos portátiles (PID, FID, rayos-X, etc.), analizando grupos de compuestos (COVs, metales, etc.) como tarea previa a un análisis más preciso. Otras veces requieren de la instrumentación clásica del laboratorio (análisis de AOX (Compuestos orgánicos halogenados absorbibles), DQO (Demanda Química de Oxígeno), COT (Carbono Orgánico Total), etc.).

La tabla 10.2 recoge un resumen de las características de cada una de las técnicas analíticas comentadas, indicándose las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas. Se ha optado por incluir las que habitualmente se utilizan para la determinación de contaminantes, no incorporándose las empleadas para la determinación de otros parámetros del suelo.

Las tecnologías indicadas pueden clasificarse en dos categorías:

Técnicas *in situ*: engloban todas aquellas que pueden realizarse en el propio emplazamiento. Estas técnicas están asociadas generalmente a instrumentos de tipo penetrómetro (CPT – Cone penetrometer) y equipos portátiles de pequeño tamaño (PID, FID, etc.), o equipos clásicos de laboratorio que han sido adaptados al trabajo en campo.

Técnicas *ex situ*: son todas aquellas que se realizan en laboratorio, generalmente asociadas a equipos que por su gran tamaño o fuentes de energía requeridas no son de aplicación en campo.

La lista no pretende ser exhaustiva de todas las técnicas existentes, sin embargo, sí se ha pretendido reflejar las más habituales en trabajos de investigación de la calidad del suelo. Para más información se debe consultar bibliografía específica como puede ser la recogida en: www.frtr.gov/site (Field Sampling and Analysis Technologies Reference Guide), www.clu-in.org/technologies.htm (Field Analytic Technologies Encyclopedia) o en el capítulo de bibliografía al final de la presente guía. En cualquier caso, antes de proceder a la selección de una u otra, el equipo de trabajo deberá, además, consultar con el laboratorio para asegurarse de que la técnica escogida sirva para alcanzar los objetivos que el estudio pretende.

La tabla recoge en la primera columna el nombre y una breve descripción de la técnica analítica. A continuación, y con el fin de poder comparar entre unas y otras, se han incluido datos relativos a:

- a) orden de magnitud de los límites de detección,
- b) contaminantes para los que se utiliza la técnica,
- c) medio o matriz sobre los que se puede aplicar y si requiere algún tipo de extracción del contaminante a otra matriz (líquido o gas, por ejemplo) y, por último,
- d) ventajas e inconvenientes de cada una de ellas.

Dentro de las técnicas de aplicación *in situ* existe un grupo de ellas asociado a equipos penetrómetros que se encuentra en continuo desarrollo tecnológico, por su versatilidad y capacidad de obtener resultados analíticos sin la necesidad de extraer muestras de suelo o de agua desde su localización original. En la tabla 10.3 se indican algunas de ellas.

En la tabla 10.4 se indica la relación entre las técnicas de detección del gas del suelo y las características de ciertos contaminantes.

En las tablas 10.5 y 10.6 se recogen los métodos y técnicas analíticas de laboratorio que se recomienda utilizar en los estudios de caracterización de suelos contaminados, diferenciando los que son aplicables a muestras de suelo y a muestras de agua. En cada caso, el equipo de trabajo seleccionará, de acuerdo con el laboratorio, los métodos y técnicas más adecuados para cumplir los objetivos del estudio. Si por algún motivo se utilizan métodos o técnicas distintas de las señaladas en las tablas, esta circunstancia deberá mencionarse y justificarse en el informe conclusivo de los trabajos.

Tabla 10.2
Resumen de técnicas analíticas

Técnica	Límites de detección (orden de magnitud)	Contaminantes	Medio			Ventajas	Inconvenientes
			Suelo	Agua	Gas/aire		
Análisis in-situ <i>Sensores químicos de fibra óptica.</i> Detectan contaminantes por el cambio en el índice de refracción en el baño de la fibra óptica, lo que altera la cantidad de luz transmitida al detector. Utilizados con penetrómetros.	10 – 100 ppm (suelos) 0,5 – 10 ppm (aguas)	TPH, COVs halogenados	E	X	X	<ul style="list-style-type: none"> Resultados en tiempo real. Puede acoplarse a equipos portátiles. Fácil accesibilidad en puntos de muestreo complicados. 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere utilizar un gran número de sensores diferentes para poder discriminar entre compuestos. No determina individualmente COVs. Mide el contenido total. Límites de detección elevados. Utilizado para contaminación de grandes superficies por el coste asociado. No puede estar expuesto a la luz solar directa. Algunos son sensibles a la temperatura. Necesidad de recalibraciones.

E = requiere extracción a fase líquida o gaseosa.

NA = no aplicable

X = aplicable

Tabla 10.2 (continuación)
Resumen de técnicas analíticas

Técnica	Límites de detección (orden de magnitud)	Contaminantes	Medio			Ventajas	Inconvenientes
			Suelo	Agua	Gas/aire		
<i>Fluorescencia inducida por láser (LIF – Laser-Induced Fluorescence).</i> Esta técnica utiliza la fluorescencia emitida por un determinado compuesto al ser expuesto a una luz láser de una determinada longitud de onda. Utilizado con penetrómetros.	10 – 100 ppm (suelos) 0,5 – 10 ppm (aguas)	PAH TPH	X	X	NA	<ul style="list-style-type: none"> Resultados en tiempo real. Gran número de análisis en poco tiempo. Acoplado a CPT (Cone Penetrometer), gran resolución vertical (cerca de 2 cm). Minimización de residuos durante la medición. 	<ul style="list-style-type: none"> Análisis de muestras complejas puede ser difícil debido a interferencias. Requiere elevada experiencia para su manejo. Utilizado para contaminación de grandes superficies por el coste asociado. Sólo en litologías que permitan el uso de técnicas de penetrómetros.
<i>Detector por fotoionización (PID – Photo Ionization Detector).</i> Consiste en una lámpara ultravioleta, acoplada a una cámara. La lámpara emite fotones que ionizan determinadas moléculas de la corriente de gas. Las moléculas ionizadas se exponen a un campo eléctrico entre electrodos generando una corriente directamente proporcional a la concentración de las moléculas ionizadas.	10 – 100 ppm (suelo) 0,5 – 10 ppm (agua) 0,1 – 0,5 ppm (aire) (técnica generalmente no cuantitativa para mezclas)	Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) no Halogenados y alguno halogenado. Sulfidrúrico.	E	E	X	<ul style="list-style-type: none"> Medida inmediata. Muy útil para el barrido en campo y selección de muestras a enviar a laboratorio. Fácil manejo y mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> No cuantitativa para mezcla de gases. No distingue entre compuestos a no ser que esté integrado a un cromatógrafo de gases. Puede dar falsos positivos si hay humedad en el medio. Sensible a cambios en las condiciones climáticas. Requiere calibraciones frecuentes.

E = requiere extracción a fase líquida o gaseosa.

NA = no aplicable

X = aplicable

Tabla 10.2 (continuación)
Resumen de técnicas analíticas

Técnica	Límites de detección (orden de magnitud)	Contaminantes	Medio			Ventajas	Inconvenientes
			Suelo	Agua	Gas/aire		
Detector de ionización por llama (FID – Flame-Ionization Detector). Mediante una bomba el gas de la muestra es enviado a una cámara de mezcla, donde en contacto con una llama de hidrógeno, se produce su ignición e ionización. Los iones son atraídos hacia un electrodo para medir la corriente resultante, proporcional a la concentración de los analitos a medir.	100 – 1.000 ppb (suelos) 1 – 50 ppb (aguas) 0,1 – 0,5 ppm (aire)	Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) no halogenados. Compuestos Orgánicos Semivolátiles (COSVs) no halogenados. Algunos COVs halogenados de bajo peso molecular.	E	E	X	<ul style="list-style-type: none"> Muy útil para el barrido en campo y selección de muestras a enviar a laboratorio. Detecta un mayor número de compuestos que el PID. 	<ul style="list-style-type: none"> No cuantitativa para mezcla de gases. No distingue entre compuestos a no ser que esté integrado a un cromatógrafo de gases. Destruye la muestra. No debe usarse en zonas potencialmente explosivas. La elevada humedad de las muestras o ambiente pueden hacer que no funcione correctamente. Sensibles a cambios bruscos de temperatura.
Explosímetros. Opera por la acción catalítica de un filamento en contacto con los gases combustibles que se pretenden medir.	10 – 100 ppm (suelos) 0,5 – 10 ppm (aguas)	Compuestos Orgánicos Volátiles no halogenados.	E	E	X	<ul style="list-style-type: none"> Portátil. Medida inmediata. Sistema de seguridad. 	<ul style="list-style-type: none"> No cuantitativa. El componente catalítico tiene una vida limitada. Requiere calibraciones periódicas. No está diseñado para medios deficientes en oxígeno.
Tubos colorimétricos. Tubos que contienen un reactivo que cambia de color en función de la concentración del contaminante. Tiene una sensibilidad específica para cada vapor o gas a analizar.	10 – 100 ppm (suelos) 0,5 – 10 ppm (aguas) 0,1 – 1 ppm (aire)	Compuestos Orgánicos Volátiles no halogenados y halogenados. Amoníaco, gases nitrosos, ácidos inorgánicos, cianuro, arsina, fosfina y otros compuestos inorgánicos.	E	E	X	<ul style="list-style-type: none"> Portátil. Fácil uso. 	<ul style="list-style-type: none"> No cuantitativa (semicuantitativa). Interferencias. Consumo de fungibles (tubos de un solo uso).

E = requiere extracción a fase líquida o gaseosa.

NA = no aplicable X = aplicable

Tabla 10.2 (continuación)
Resumen de técnicas analíticas

Técnica	Límites de detección (orden de magnitud)	Contaminantes	Medio			Ventajas	Inconvenientes
			Suelo	Agua	Gas/aire		
Test colorimétricos. Equipos portátiles que utilizan reacciones químicas que producen cierta coloración para detectar analitos en suelos y aguas. La intensidad de la coloración, proporcional a la concentración del contaminante, puede ser determinada bien visualmente o bien por medio de fotómetros.	10 – 100 ppm (suelos) 0,5 – 10 ppm (aguas)	Compuestos Orgánicos Semi volátiles (COSVs) no halogenados. Compuestos Orgánicos Semivolátiles (COSVs) halogenados. PAH. TPH. Metales. Otros compuestos inorgánicos (asbestos, cianuros, fluoruros).	X	X	NA	<ul style="list-style-type: none"> Económico. Portátil. Fácil de usar. Datos en tiempo real. 	<ul style="list-style-type: none"> Posibles interferencias. Resultados cualitativos o semicuantitativos. No gran número de análisis diarios. Consumo de reactivos.
Electrodos selectivos. Consiste en una membrana que responde selectivamente a un ion determinado, y que está en contacto, por una parte, con la disolución del ion a determinar, y por otra, generalmente, con una disolución del mismo ion a una actividad fija, la cual está a su vez en contacto con un electrodo de referencia apropiado.	0,1 – 1 ppm (aguas)	Aniones y cationes, CO ₂ , Conductividad, O ₂ disuelto, pH, Salinidad.	E	X	NA	<ul style="list-style-type: none"> Económico. Portátil. Datos en tiempo real. Resultados cuantitativos. 	<ul style="list-style-type: none"> Posibles interferencias según el análisis. Consumo de reactivos.

E = requiere extracción a fase líquida o gaseosa.

NA = no aplicable X = aplicable

Tabla 10.2 (continuación)
Resumen de técnicas analíticas

Técnica	Límites de detección (orden de magnitud)	Contaminantes	Medio			Ventajas	Inconvenientes
			Suelo	Agua	Gas/aire		
Espectrometría de infrarrojos. Medida de la longitud de onda e intensidad de la luz infrarroja absorbida por una muestra, específico para cada compuesto. Identifica los compuestos a partir de su espectro de absorción característico.	10 – 100 ppm (suelos) 0,5 – 10 ppm (aguas)	COVs halogenados. COVs no halogenados. COSVs halogenados. COSVs no halogenados.	E	E	X	<ul style="list-style-type: none"> Muy rápido. Puede medir simultáneamente varios compuestos. Puede ser portátil. 	<ul style="list-style-type: none"> Interferencias por humedad. Interferencias químicas.
Fluorescencia de rayos-X Esta técnica consiste en irradiar rayos-x primarios de mayor energía que la radiación X característica de los elementos de la muestra a analizar, dando lugar a la excitación de dichos elementos y emisión de rayos X de energía característica de cada elemento, separables en diferentes longitudes de onda. Esta energía es analizada por un detector de difracción de rayos X o de estado sólido (Si(Li)).	10 – 100 ppm (suelos) 0,5 – 10 ppm (agua) 20 – 1.000 ppm, dependiendo del vendador y elemento analizado. Los equipos portátiles tienen límites de detección generalmente un orden de magnitud superior a ICP-AES.	Metales	X	X	E	<ul style="list-style-type: none"> Portátil. Rapidez (medidas en 5 minutos). Medida de hasta 35 elementos al mismo tiempo. No se destruye la muestra. Mínima preparación de la muestra. Facilidad de manejo. 	<ul style="list-style-type: none"> Límite de detección elevado para algunos metales. Las muestras líquidas deben ser tratadas en laboratorio. Interferencias entre algunos elementos (As y Pb). Requiere licencia en caso de fuente radioactiva. Alto coste de mantenimiento en algunos equipos.

E = requiere extracción a fase líquida o gaseosa.

NA = no aplicable

X = aplicable

Tabla 10.2 (continuación)
Resumen de técnicas analíticas

Técnica	Límites de detección (orden de magnitud)	Contaminantes	Medio			Ventajas	Inconvenientes
			Suelo	Agua	Gas/aire		
Inmunoensayos. Utiliza anticuerpos para el bloqueo de un contaminante o grupo de contaminantes determinados. La cuantificación se hace por cambio de color, bien visualmente o por fotometría.	10 – 100 ppm (suelos). 0,5 – 10 ppm (agua).	COVs halogenados y no halogenados. COSVs halogenados y no halogenados. PAH. TPH. Pesticidas/herbicidas. Mercurio. Metales.	X	X	NA	<ul style="list-style-type: none"> Rapidez. Portátil. Fácil de usar. Relativamente económico. 	<ul style="list-style-type: none"> Semicuantitativo. Interferencias. Pueden producirse falsos positivos. Necesidad de información previa acerca del contaminante a medir.
Bioensayos. Equipos cuyo sensor es una enzima, anticuerpo, ácido desoxirribonucleico o microorganismo y cuyo transductor es un dispositivo electroquímico, acústico u óptico. Indicador de riesgo ecológico.	NA	COVs halogenados y no halogenados. COSVs halogenados y no halogenados. PAH. Pesticidas/herbicidas. Metales. Cianuros, asbestos, fluoruros.	X	X	X	<ul style="list-style-type: none"> Económico. Puede ser portátil. 	<ul style="list-style-type: none"> No cuantitativo. Requiere experto.

E = requiere extracción a fase líquida o gaseosa.

NA = no aplicable

X = aplicable

Tabla 10.2 (continuación)
Resumen de técnicas analíticas

Técnica	Límites de detección (orden de magnitud)	Contaminantes	Medio			Ventajas	Inconvenientes
			Suelo	Agua	Gas/aire		
Análisis Ex-situ							
Cromatografía de gases + detectores (GC). Utilizado para separar y analizar contaminantes a partir de mezclas complejas. En combinación con un detector sirve para identificar cualquier tipo de compuesto orgánico. Detectores (selección en función del compuesto a analizar): TCD (Conductividad térmica) FID (Ionizador de llama) ECD (Captura de electrones) AID (Ionizador de Argón) PID (fotoionizador) ELCD (conductividad electrolítica) FPD (llama fotométrica)	100 – 1.000 ppb (suelos) 1 – 50 ppb (aguas)	COVs halogenados. COVs no halogenados. COSVs no halogenados. COSVs halogenados. PAH. Pesticidas /herbicidas. TPH.	E	E	X	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de una amplia gama de compuestos orgánicos. • Existen equipos portátiles. • Límites de detección bajos. • Muy buena calidad de datos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se requiere gran experiencia. • Requiere mantenimiento y limpieza adecuada para evitar contaminaciones cruzadas. • Interferencias. • Los equipos portátiles son costosos.
Espectrometría de masas (MS). Determina la masa de átomos o moléculas de una matriz dada. Produce la carga de las partículas de la sustancia química a analizar y entonces utiliza campos magnéticos y eléctricos para medir la masa de las partículas cargadas.	10 – 100 ppm (suelos) 0,5 – 10 ppm (aguas)	COVs halogenados. COVs no halogenados. COSVs no halogenados. COSVs halogenados. PAH. Pesticidas /herbicidas.	E	E	X	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación de compuestos. • Existen equipos portátiles. • Límites de detección bajos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Consume gran cantidad de energía. • Requiere mucho tiempo para el arranque del equipo. • El tiempo necesario para la calibración es mayor que en GC. • Puede no detectar algunos semivolátiles como los benzopirenos. • Resolución pobre en muestras complejas. • Requiere un alto grado de experiencia en su manejo.

E = requiere extracción a fase líquida o gaseosa.

NA = no aplicable

X = aplicable

Tabla 10.2 (continuación)
Resumen de técnicas analíticas

Técnica	Límites de detección (orden de magnitud)	Contaminantes	Medio			Ventajas	Inconvenientes
			Suelo	Agua	Gas/aire		
Cromatografía de gases – espectrometría de masas (GC/MS). Técnica híbrida que combina la capacidad de separación de la cromatografía y la capacidad analítica de la espectrometría de masas, ofreciendo datos en tiempo real.	10 – 100 ppb (suelos) 1 – 50 ppb (aguas)	COVs halogenados. COVs no halogenados. COSVs no halogenados. COSVs halogenados. PAH. Pesticidas /herbicidas.	E	E	X	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de identificar y cuantificar cualquier compuesto orgánico. • Límites de detección bajos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de calibración elevado. • Ver inconvenientes de las técnicas GC y MS.
Espectrometría de Absorción Atómica (AA). Basada en la absorción de la energía emitida por átomos en estado gaseoso. Los átomos de los analitos de muestras sólidas o líquidas son vaporizados en un horno de llama o grafito. Los átomos absorben la luz ultravioleta o visible pasando a niveles de energía superior.	100 – 1.000 ppb (suelos) 1 – 50 ppb (aguas)	Metales.	E	X	X	<ul style="list-style-type: none"> • Alta sensibilidad y bajos límites de detección. • Análisis directo en muestras líquidas. • Pocas interferencias. • Tamaño de muestra requerido pequeño. 	<ul style="list-style-type: none"> • No es portátil. • Un elemento por medida. • Requiere fuente de energía para el quemador.
Espectroscopía de Plasma Inducido Acoplado – Espectroscopía de Emisión Atómica (ICP-AES). La espectroscopía de emisión atómica mide la emisión óptica de átomos excitados para la determinación de la concentración. El plasma inducido acoplado (ICP) es una fuente de energía muy potente la cual logra la vaporización, excitación e ionización atómica.	100 – 1.000 ppb (suelos) 1 – 50 ppb (aguas)	Metales.	E	X	X	<ul style="list-style-type: none"> • Límites de detección bajos. • Puede medir a la vez un gran número de elementos. 	<ul style="list-style-type: none"> • El hierro y el uranio pueden producir interferencias.

E = requiere extracción a fase líquida o gaseosa.

NA = no aplicable

X = aplicable

Tabla 10.3
Comparación de técnicas analíticas aplicadas a penetrómetros

Técnica	Aplicación	Medio	Ventajas	Inconvenientes
Fluorescencia inducida por láser (LIF- <i>Laser Induced Fluorescence</i>).	Barrido de hidrocarburos en campo. Medidas a tiempo real. Específico para: gasolinas, gasóleo, fuel oil, aceites de motor, grasas y alquitranes con PAH.	Suelo Aguas subterráneas	<ul style="list-style-type: none"> Proporciona información geológica y química en campo. Capaz de alcanzar hasta 100 metros de perforación al día. Gran resolución espacial. Permite obtener información vertical de pequeños niveles que pasarían desapercibidos con otras técnicas. No genera residuos. Las varillas y sondas se limpian fácilmente entre puntos, quedando adecuadamente envasados los fluidos de limpieza. 	<ul style="list-style-type: none"> El instrumental es muy complejo por lo que se requiere personal especializado. Los resultados no son cuantitativos. Solo para terrenos no consolidados y zonas accesibles a vehículo de 20 ton (CPT – Cone Penetrometer). Interferencias. (calcita, materia orgánica, detergentes, etc.). Los límites de detección dependen del tipo de hidrocarburo y del terreno.
Fluorescencia de mercurio.	Barrido de contaminantes. Específico para: jet fuel, gasóleo, gasolina sin plomo, gasóleo de calefacción y aceites de motor, alquitranes y creosotas.	Suelo Aguas subterráneas	<ul style="list-style-type: none"> Acorta el tiempo requerido para definir extensión de plumas de contaminación por hidrocarburos procedentes de fugas de tanques enterrados. Datos a tiempo real y modelización tridimensional rápida de plumas de contaminación. Los equipos son menos costosos que los de fibra óptica. 	<ul style="list-style-type: none"> Sensible a las condiciones ambientales. Menor sensibilidad en condiciones climáticas de bajas temperaturas. Interferencias (calcita, materia orgánica, detergentes, etc.). Límites de detección dependen del tipo de hidrocarburo y del terreno.
Sensor de membrana (MIP – <i>Membrane Interface Probe</i>).	Identificación de COVs en función del detector utilizado. Empleado para caracterizar la composición química de suelos.	Suelos Aguas subterráneas	<ul style="list-style-type: none"> Proporciona información sobre la distribución y vías de movilización de contaminantes. Puede identificar y cuantificar compuestos específicos utilizando un detector. 	<ul style="list-style-type: none"> Puede no diferenciar entre COVs si utiliza detectores PID o FID. Los resultados son menos precisos en la zona no saturada.
Muestreador de desorción térmica (TDS – <i>Thermal Desorption Sampler</i>).	Caracterización de contaminación por COV en la zona no saturada, producida por fugas de hidrocarburos o disolventes clorados.	Suelos Gas del suelo	<ul style="list-style-type: none"> No le afecta la humedad del suelo, salvo cuando está saturado. Bajos límites de detección. Resultados casi a tiempo real. 	<ul style="list-style-type: none"> Sólo para zona no saturada. La precisión disminuye con la variación del peso y volumen de la muestra.

Tabla 10.4 Aplicabilidad de técnicas de evaluación del gas del suelo para diferentes compuestos	
Grupo de contaminantes	Aplicación de las técnicas de evaluación del gas del suelo
<i>Grupo A: Derivados halogenados del metano, etano y eteno</i>	
Cloroformo, cloruro de vinilo, tetracloruro de carbono, triclorofluorometano, EDB, TCE	Pueden ser detectados en el gas del suelo en una amplia gama de medios. Si hay producto puro, forman fases no acuosas más densas que el agua (DNAPL) que se hundirán en el acuífero.
<i>Grupo B: Derivados halogenados del propano, propeno y benceno</i>	
Clorobenceno, Triclorobenceno, 1,2 dicloropropano	Aplicación limitada. Son detectables mediante esta técnica únicamente cuando se puede tomar muestra cerca del suelo o del agua subterránea contaminados. DNAPL.
<i>Grupo C: Compuestos aromáticos policíclicos halogenados</i>	
Aldrina, DDT, clordano, heptacloro, PCBs	No son detectables en condiciones normales por medio de estas técnicas. DNAPL.
<i>Grupo D: Hidrocarburos del petróleo C₁-C₈</i>	
Benceno, tolueno, isómeros del xileno, metano, etano, ciclohexano, gasolina, JP-4	Pueden ser detectados con esta técnica en acuíferos someros o en áreas en las que se han producido fugas desde depósitos enterrados o tuberías, siempre que se tomen datos cerca de la fuente de contaminación. Forman capas de menor densidad que el agua (LNAPLs) que flotan sobre el nivel freático. Pueden actuar como solventes para los DNAPLs, manteniéndolos cerca de la superficie del suelo.
<i>Grupo E: Hidrocarburos del petróleo C₉-C₁₂</i>	
Trimetilbenceno, naftaleno, decano, gasóleo y fuels Jet A	Aplicación limitada. Son detectables mediante esta técnica únicamente cuando se puede tomar muestra cerca del suelo o del agua subterránea contaminados. NAPL.
<i>Grupo F: Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos</i>	
Antraceno, benzopireno, fluoranteno, criseno, aceites de motor, asfaltos	No pasan a la fase gas de manera adecuada como para poder ser medidos con esta técnica en condiciones normales. NAPL.
<i>Grupo G: Compuestos oxigenados de bajo peso molecular</i>	
Acetona, etanol, formaldehído, metiletilcetona	LNAPL, pero se disuelven con rapidez en el agua subterránea. Pueden detectarse mediante estas técnicas pero si se presentan como consecuencia de una fuga o derrame en suelo relativamente seco.

De USEPA, 1991a

Tabla 10.5 Métodos y técnicas analíticas para suelos						
Parámetro	Método					Técnica analítica
	EPA	ISO	UNE	NEN	DIN	
pH	9041					Papel indicador
	9045					Potenciometría
		10390	77305			Potenciometría
	9050			5750		Conductancia
Conductividad		11265	77308			Conductancia
	9050					Conductancia
Granulometría	11277	77314	5753			Tamizado/sedimentación
Materia Orgánica				(*)		Calcinación
COMPUESTOS INORGÁNICOS						
Cianuro	9013+9010					Dest+UV/VIS-valoración
	9213					Potenciometría
Cianuro	9212			6655		UV/VIS
						UV/VIS
	9014 9010					UV/VIS / Valoración
Aniones (F ⁻ , Cl ⁻ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , Br ⁻ , SO ₄ ²⁻)	9056					IC
F ⁻	9214					Potenciometría
Nitrógeno Kjeldahl		11261	77318			Valoración
NO ₃ ⁻	9210					Potenciometría
	9200					UV/VIS
N-NH ₄ ⁺ , N-NO ₃ ⁻ , Nsol		14255	77306			UV/VIS
P		11263				UV/VIS
SO ₄ ²⁻	9035					UV/VIS
	9036					UV/VIS
Na, K	7770 7610					FAAS
Metales pesados (Extracción)	3050	11466		6465		
Metales pesados (determinación)	Serie 7000					FAAS/GFAAS
	6010					ICP-AES
Metales pesados excepto As y Hg (determinación)		11047	77309	5762 5758 5763 5761		FAAS
Metales pesados excepto Hg (determinación)	6020					ICP-MS
As (determinación)	7060					GFAAS
	7061					HGAAS
	7062					HGAAS
				5760		HGAAS
Hg (determinación)	7471			5764		CVAAS

Tabla 10.5 (continuación) Métodos y técnicas analíticas para suelos						
Parámetro	Método					Técnica analítica
	EPA	ISO	UNE	NEN	DIN	
COMPUESTOS ORGÁNICOS						
Aceites y grasas	9070 9071					Gravimetría
		11046	77307	5733		IR-GC
BTEX	8010					GC-ELCD
	8021					GC-ELCD+PID
	8260					GC-MS
	8020					GC-PID
EOX (Compuestos Organohalogenados)	9023					Valoración
				5735 5777	38414-S17	Valoración
COT (Carbono Orgánico Total)	9060					FID/IR
		10694 14235				IR/Val/Grav/FID UV/VIS
COSVs (Comp. Orgánicos Semivolátiles)	8410					GC-FID
	8270					GC-MS
	8015					GC-FID
	8260					GC-MS
	602					GC-PID
	8010					HSD
Dibenzo-p-dioxinas Dibenzofuranos	1613 8290					GC-HRMS
	8280					GC-MS
Fenoles totales	9065 9066 9067					UV/VIS
Hidrocarburos clorados	8121					GC-ECD
	8120					GC-MS
Herbicidas clorados	8151					GC-ECD
PAH (Hidrocarburos aromáticos policíclicos)	8270					GC-MS
	8310					HPLC-UV
		13877	77319	5731		HPLC-UV
	8100					GC-FID
PCBs	8082					GC-ECD
				5734		GC-ECD
Pesticidas organohalogenados	8081					GC-ECD
	1656					GC-HSD
		15913				GC-MS
TPH (Hidrocarburos Totales del Petróleo)	8015					GC-FID
						(**) GC-FID
	8440					IR

(*) El método para determinación de carbono orgánico oxidable de los "Métodos oficiales de análisis" del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (1994).

(**) TNRC 1005/6 (Separación de hidrocarburos por longitudes de cadena y separadamente alifáticos y aromáticos).

La determinación de la granulometría del suelo es importante en la medida que condiciona el comportamiento de los metales pesados. A este respecto, la cuantificación de la fracción arcillosa (< 2 micras) es el factor más interesante. Aunque los métodos citados en la tabla anterior contienen protocolos para establecer la distribución granulométrica completa del suelo, se pueden aceptar otros métodos más simples tendentes a cuantificar sólo la fracción arcillosa, siempre y cuando se encuentren suficientemente reconocidos.

Por otra parte, dada la trascendencia que tiene el proceso de extracción/digestión en la cuantificación de los metales pesados en muestras de suelos, la tabla anterior recoge tres métodos para la realización de dicho proceso. Si bien todos ellos responden al concepto de "digestión fuerte o total", se considera preferible la utilización de los métodos ISO o NEN (basados en el uso de agua regia y digestión a reflujo) frente al método EPA. En la digestión de muestras para posterior determinación de Hg se debe prestar especial cuidado en utilizar dispositivos que permitan recoger el mercurio volatilizado en el proceso.

En cuanto a la determinación de metales pesados (excluidos As y Hg) se citan en la tabla tanto técnicas de espectrometría de absorción atómica (AAS) como de IPC. La conveniencia de utilizar unas u otras se decidirá caso por caso, teniendo en cuenta los objetivos del estudio y, en particular, los límites de detección que es preciso alcanzar para poder evaluar adecuadamente los resultados analíticos.

Tabla 10.6 Métodos y técnicas analíticas para agua							
Parámetro	Método						Técnica analítica
	EPA	SM	ASTM	ISO	UNE	OTROS	
pH	9041						Papel indicador
	150.1/2	4500 H+B	D1293-95				Potenciometría
	9040						Potenciometría
Conductividad	120.1	2510 B	D1125-95A	7888	27888		Conductancia
	9050						Conductancia
O ₂ disuelto			D888-92A				UV/VIS
	360.1	4500 O-G	D888-92B	5814	25814		Potenciometría
	360.2	4500 O-C		5813	25813		Valoración
Temperatura	170.1	2550 B					Termómetro
Acidez	305.1	2310 B	D1067-92				Valoración
Alcalinidad	310.2						UV/VIS
	310.1	2320 B	D1067-92B	9963	9963		Valoración
Dureza			D511-93B				FAAS/Valoración
		2340 B					ICP
	200.7	3120 B					ICP-AES
	130.1						UV/VIS
DBO				9408	9408		Respirómetro
	405.1	5210 B		5815	1899		Valoración/ Potenciometría
				10707	10707		
DQO	410.4	5220 D	D1252-88B				UV/VIS
	410.1/2/3	5220 C	D1252-88A	15705	77004	6060	Valoración

Tabla 10.6 (continuación) Métodos y técnicas analíticas para agua							
Parámetro	Método						Técnica analítica
	EPA	SM	ASTM	ISO	UNE	OTROS	
COMPUESTOS INORGÁNICOS							
Cianuro	335.1	4500 CN-G	D2036-98B				Destilación
	9010						Dest+UV/VIS-val
	9213	4500 CN-F	D2036-91				Potenciometría
Cianuro	335	4500 CN-E	D2036-98A	14403	14403		UV/VIS
	9212						UV/VIS
	9014			6703-1			UV/VIS / Valoración
	9010						UV/VIS / Valoración
		4500 CN-D					Valoración
Aniones (F ⁻ , Cl ⁻ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , Br ⁻ , SO ₄ ²⁻)		4500	4500				UV/VIS
	9056			10304	10304		HPLC
F	300.0	4110 B	D4327-91				IC
	340.1/3	4500 F-D/E	D1179-93A				UV/VIS
	340.2	4500 F-C	D1179-93B	10359	77044		Potenciometría
	9214						Potenciometría
Nitrógeno Kjeldahl	351.1/2	4500 NH3-G	D3590-89B				UV/VIS
	351.3		D3590-89A				UV/VIS / Valoración
	351.4	4500 N _{org}					Potenciometría
		4500 NH3-C					Valoración
N				5663	25663		UV/VIS / Valoración
NO ₂ , NO ₃	353	4500 NO3	D3867-90				UV/VIS
N-NO ₂ , N-NO ₃				13395			UV/VIS
NO ₃ ⁻	9210						Potenciometría
		4500 NO3-D					Potenciometría
	352.1	419 D		7890			UV/VIS
9200						UV/VIS	
NO ₂ ⁻	354	4500 NO2		6777			UV/VIS
N-NH ₄ ⁺				11732	11732		UV/VIS
					77028		UV/VIS / Valoración
NH ₄ ⁺		4500 NH3-B		5664			Destilación /Valoración
	350.3	4500 NH3-D	D1426-93B	6778			Potenciometría
	350.1	4500 NH3-F/G		7150			UV/VIS
P	365.4			6878			UV/VIS
P, PO ₄ ³⁻	365.1/2/3			11263			UV/VIS
SO ₄ ²⁻	375.3	4500 SO4C/D		77048			Gravimetría
				77049			Turbidimetría
	375						UV/VIS
	9036						UV/VIS
9035						UV/VIS	

Tabla 10.6 (continuación) Métodos y técnicas analíticas para agua							
Parámetro	Método						Técnica analítica
	EPA	SM	ASTM	ISO	UNE	OTROS	
Cationes (Li ⁺ , Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , K ⁺ , Mn ²⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Sr ²⁺ , Ba ²⁺)				14911	14911		IC
Na, K	273	3500 D		9964			FAES/FAAS
	258					FAAS	
	7770 7610						
Na, K, Mg		3111 B					FASS
Mg	242.1		D511-93B	7980	7980		FAAS
		3500 MgD					Gravimetría
			D511-77A				Valoración
Metales pesados		3500					UV/VIS
			D4190-82				DCP-AES
		3111C			8288		FAAS
	serie 200		Varias	Varias	Varias		FAAS/GFAAS
	serie 7000						FAAS/GFAAS
Metales pesados	200.9	3113 B	D3919				GFAAS
	200.7	3120 B		11885	11885		ICP-AES
	6010						ICP-AES
	200.8						ICP-MS
	6020						ICP-MS
As	7063						ASV
	206.4	3500 As-C	D2972-93A		26595		UV/VIS
	206.2	3113 B	D2972-93C				GFAAS
	7060						GFAAS
	206.3	3114 B	D2972-93B	11969	11969		HGAAS
	7061						HGAAS
	7062						HGAAS
Hg	7472						ASV
	245.1/2	3112 B	D3223-91	5666	1483		CVAAS
	7470			16590	12338		CVAAS
COMPUESTOS ORGÁNICOS							
Aceites y grasas		5520 B					Gravimetría
	9070						Gravimetría
	9071						
	413.1	5520 E					IR
				11046	77307	NEN5733	
BTEX	8010						GC-ELCD
	8021						GC-ELCD+PID
	8260						GC-MS
	8020						GC-PID
AOX (Comp. Organohalogenados absorbibles)	1650			9562	1485		Valoración

Tabla 10.6 (continuación) Métodos y técnicas analíticas para agua							
Parámetro	Método						Técnica analítica
	EPA	SM	ASTM	ISO	UNE	OTROS	
EOX (Comp. Organohalogenados extraíbles)	9023						Valoración
COT (Carbono Orgánico Total)	9060						FID/IR
	415.1	5310	D25489-93				IR
				8245	1484		IR/Val/FID
COSVs (Comp. Orgánicos Semivolátiles)	8410						GC-FTIR
	525.2	6410 B					GC-MS
	625						GC-MS
COVs (Comp. Orgánicos Volátiles)	8270						GC-MS
	1671						GC-FID
	8015						GC-FID
	524.2	6210 B					GC-MS
	1624						GC-MS
1666						GC-MS	
Dibenzo-p-dioxinas Dibenzofuranos	624						GC-MS
	8260						GC-MS
	502.2						GC-PID+EC
	602	6220 B					GC-PID
	8010						HSD
Disolventes clorados	1613						GC-HRMS
	8290						GC-MS
Disolventes clorados	8280						GC-MS
	551.1						GC-ECD
Fenoles totales				8165-2			GC-ECD
	420.1/2	5530	D1783-01	6439	77053		UV/VIS
				14402	14402		UV/VIS
Hidrocarburos clorados	9065						UV/VIS
	9066						UV/VIS
	9067						UV/VIS
Hidrocarburos clorados	612						GC-ECD
	8121						GC-ECD
	8120						GC-MS
Herbicidas clorados	515.1/2/3	6640 B					GC-ECD
	615						GC-ECD
	1658						GC-ECD
PAH (Hidrocarburos aromáticos policíclicos)	8151						GC-ECD
	610	6440 B					GC-FID/HPLC-UV
PAH (Hidrocarburos aromáticos policíclicos)	8100						GC-FID
	8270						GC-MS
PAH (Hidrocarburos aromáticos policíclicos)	8310						HPLC-UV
	550/1	6440 B	D4657-92				HPLC-UV
	610						HPLC-UV/F
				17993			HPLC-UV/F
PCBs	8082						GC-ECD
	508 A		D3534-85				GC-ECD

Tabla 10.6 (continuación)							
Métodos y técnicas analíticas para agua							
Parámetro	Método						Técnica analítica
	EPA	SM	ASTM	ISO	UNE	OTROS	
Pesticidas organofosforados	614/1 622 1657				12918		GC-NPD
Pesticidas Organohalogenados	608.1/2	6630 B	D5812-96				GC-ECD
	8081						GC-ECD
	1656						GC-HSD
				15913			GC-MS
Pesticidas Organonitrogenados	633						GC-NPD
TPH (Hidrocarburos Totales del Petróleo)	8015					TNRCC 1005/6 (*)	GC-FID
	418.1						IR
	8440						IR

(*) TNRCC 1005/6 (Separación de hidrocarburos por longitudes de cadena y separadamente alifáticos y aromáticos)

BIBLIOGRAFÍA

- Acuerdo de 25 de octubre de 2001, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Plan Regional de Actuación en materia de Suelos Contaminados de la Comunidad de Madrid. BOCM N° 283, 28 de Noviembre.
- Aguilo Alonso, M; 1992. Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Monografías de la Secretaría de Estado para las Políticas del Agua y del Medio Ambiente. MOPT.
- ASTM, 1998. Standard practice for environmental site assessment (phase 2). E1903-97.
- 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.
- Bundesgesetzblatt Jahrgang 1999 Teil 1 Nr. 36. 1999. Bundes-Bodenschutz-und Altlastenverordnung. (Legislación sobre suelos potencialmente contaminados). Alemania.
- 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, 2001. Preliminary investigation. CSA Standard Z768-01.
- Custodio, E.; Llamas, M.R.; 1983. Hidrología Subterránea. Ed. Omega, Barcelona.
- Decreto 326/1999, de 18 de noviembre, por el que se regula el régimen jurídico de los suelos contaminados de la Comunidad de Madrid. BOCM N° 280, 25 de Noviembre.
- DIN (Deutsches Institut für Normung), Septiembre 2002. Environmental assessment of sites and organizations. DIN ISO 14015. Alemania.
- 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. IGME, Madrid.
- IHOBE, S.A. 2002. Manual práctico para la investigación de la contaminación del suelo. Gobierno Vasco. Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente.
- IHOBE, S.A. 1998a. Guía metodológica para la Investigación de la contaminación del suelo. Estudio Histórico y diseño de muestreo. Gobierno Vasco. Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente.
- IHOBE, S.A. 1998b. Guía metodológica para la Investigación de la contaminación del suelo. Calidad de Suelo, Valores Indicativos de Evaluación. Gobierno Vasco. Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente.
- IHOBE, S.A. 1998c. Guía metodológica para la Investigación de la contaminación del suelo. Análisis químico. Gobierno Vasco. Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente.
- IHOBE, S.A. 1998d. Guía metodológica para la Investigación de la contaminación del suelo. Toma de muestras. Gobierno Vasco. Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente.
- Karklins, Steve. 1996. Groundwater Sampling Desk Reference. Wisconsin Department of Natural Resources. Bureau of Drinking Water and Groundwater.
- Ley 5/2003, de 20 de marzo, de Residuos de la Comunidad de Madrid. BOCM N° 76 de 31 de marzo.
- López Jimeno, C et Al., 2000. Manual de sondeos. Tecnología de perforación. Ed. Carlos López Jimeno.

- National Groundwater & Contaminated Land Center. Julio 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. NGCLC, UK.
- NNI, 1999a. Survey Strategy for soil investigation NEN 5740. NNI, Holanda.
- NNI, 1999b. 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.
- SDU Uitgevers; 2000. Manual of Soil Decontamination Technologies. Supplement 17 of Handboek Bodemsaneringstechnieken, SDU, La Haya, Holanda.
- 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.
- UNE-EN ISO 5667-3. Octubre 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, Noviembre 1991a. Seminar Publication. Site Characterization for Subsurface Remediation. EPA/625/4-91/026.
- USEPA, Noviembre 1991b. Description and Sampling of Contaminated Soils. A Field Pocket Guide. EPA/625/12-91/002.
- USEPA, Julio 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, Julio 1996a. Soil Screening Guidance: User's Guide. Publication 9355.4-23 EPA.
- USEPA, mayo 1996b. Soil Screening Guidance: Technical Background Document. EPA/540/R95/128.
- USEPA, abril 1996c. Low-flow (minimal drawdown). Groundwater sampling procedures. EPA/540/S-95/504.
- USEPA, Noviembre 1997a. Field Analytical and Site Characterization Technologies Summary of Applications. EPA-542-R-97-011.
- USEPA, Marzo 1997b. Expedited Site Assessment Tools For Underground Storage Tank Sites. A Guide For Regulators. EPA 510-B-97-001.
- USEPA, octubre 1999. Improving Site Assessment: Combined PA/SI Assessments. EPA/540/F-98/038.
- USEPA, Agosto 2000. Guidance for the Data Quality Objective Process. EPA QA/G-4. EPA/600/R-96/055.
- USEPA, Marzo 2001. Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites. Peer Review Draft. OSWER 9355.4-24.

Direcciones en Internet

- Archivos PDF sobre política en la UE
http://www.clarinet.at/library/proceedings_finalconf.pdf
- Documentos sobre directivas ECN
<http://www.ecn.ac.uk/protocols/Terrestrial/S.DOC>
- Sinopsis de protocolos de muestreo
<http://www.iso.ch/iso/en/CatalogueListPage.CatalogueList?ICS1=13&ICS2=80&ICS3=5>
- Publicaciones de leyes de contaminación de suelos
<http://www.defra.gov.uk/environment/land/contaminated/pubs.htm>
- Protocolos de investigación de suelos
<http://www.astm.org/cgi-bin/SoftCart.exe/DATABASE.CART/MARKETINGCODES/EN2.htm?U+mystore+sbok9535>
- En la sección de política en Europa puede consultarse la política específica en cada país.
<http://www.clarinet.at>
- Archivos PDF para investigaciones en subsuelo.
<http://www.deq.state.ms.us>
- Archivos PDF sobre métodos de investigación de suelos.
http://www.ics.trieste.it/chemistry_remediation.aspx
- Información sobre investigación de suelos
<http://www.peerenvironmental.com/phase1des.htm>
- Sitio AFNOR. Legislación. (Francia)
<http://www.boutique.afnor.fr/Boutique.asp>
- Sitio DIN. Directivas.
http://www2.beuth.de/index_en.php3
- Sinopsis de páginas de varios países con directivas en general (buscador de directivas relacionadas con investigación de suelos)
<http://www.cenorm.be/catweb/cwen.htm>
- Legislación británica.
<http://bsonline.techindex.co.uk/BS12/Dir1/SitePage.asp?LS=&PgID=0002>
- Legislación belga.
<http://www.ovam.be>
- Remediation and Characterization Innovative Technologies (EPA REACH IT)
www.epareachit.org
- Federal Remediation Technologies Roundtable. The field Sampling and Analysis Technologies Matrix.
www.frtr.gov
- Field Analytic Technologies Encyclopedia.
www.fate.clu.in.org

ANEXO 1

LISTA DE CHEQUEO. EQUIPOS DE MUESTREO Y DOCUMENTOS

Nº de ud's previstas	Comprobación	Documentos
—	—	Plan de muestreo
—	—	Plan de seguridad y salud
—	—	Fichas de toma de datos

Nº de ud's previstas	Comprobación	Equipos de protección
—	—	Botas de seguridad
—	—	Guantes
—	—	Ropa de trabajo
—	—	Casco
—	—	Protectores auditivos
—	—	Mascarillas / máscaras / filtros
—	—	Impermeable
—	—	Repelente contra mosquitos
—	—	Protector solar

Nº de ud's previstas	Comprobación	Varios
—	—	Llaves para acceder al emplazamiento / aceite lubricante.
—	—	Cámara de fotos
—	—	Calculadora
—	—	Escalímetro

Nº de ud's previstas	Comprobación	Material para toma de datos
—	—	Block notas
—	—	Rotuladores indelebles
—	—	Lápices de colores / borrador / sacapuntas / marcadores
—	—	Etiquetas
—	—	Cadena de custodia para envío a laboratorio
—	—	Plano con localización de puntos de muestreo
—	—	Criterios para clasificación en campo de textura (Brady, 1990)
—	—	Lámina de plástico para colocar testigos para su descripción
—	—	Cuchillo (para limpiar la parte superficial del testigo)
—	—	Escalas para la determinación de tamaño de grano

Nº de ud's previstas	Comprobación	Equipos de muestreo
		Equipos manuales
—	—	Cucharas
—	—	Palas
—	—	Espátulas
—	—	Cubos
—	—	Utiles de limpieza de material
—	—	Martillo / cincel para romper roca
—	—	Herramientas
		Equipos mecánicos
—	—	Cobra
—	—	Martillo percutor
		Equipos para preparación de muestras
—	—	Cubos/botes para la mezcla de muestras (acero inoxidable, vidrio, Teflon®, aluminio (salvo para Al), bolsas de plástico (únicamente para metales))
—	—	Plástico o lona para preparación de muestra (1 m ² aprox.)
		Material para la recogida de residuos de muestreo y muestras
—	—	Bolsas de plástico oscura para material sucio
—	—	Bolsas herméticas para material que no deba contaminarse (cámara, block de notas, bolígrafos, etc.)
—	—	Bolsas de basura.
—	—	Bolsas de plástico herméticas para muestras
—	—	Tarros de cristal de cierre hermético

Nº de ud's previstas	Comprobación	Equipos de medición in situ
—	—	Detector por Fotoionización (PID)
—	—	Gas de calibración del PID
—	—	Explosímetro
—	—	PH metro de agua / suelo
—	—	Tampones de pH (4 y 7) para calibración
—	—	Balanza
—	—	Vasos para la mezcla de agua y suelo (pH, etc)
—	—	Conductímetro y estándares específicos
—	—	Medidor de O ₂ disuelto
—	—	Agua destilada
—	—	Espátulas para toma de alícuotas de suelo
—	—	Papel de limpieza
—	—	HCl al 10% en botellitas cuentagotas (test carbonatos)
—	—	Agua oxigenada (test manganeso, test de materia orgánica)