

Guía para la investigación de suelos potencialmente contaminados

Rev.0. Enero 2017

GUÍA PARA LA INVESTIGACIÓN DE SUELOS POTENCIALMENTE CONTAMINADOS



PRÓLOGO

La presente “Guía para la investigación de suelos potencialmente contaminados” constituye uno de los documentos reconocidos recogidos en el capítulo IV del Decreto 18/2015, por el que se aprueba el reglamento que regula el régimen aplicable a los suelos contaminados en Andalucía.

La finalidad del documento es la de poner a disposición de los titulares de actividades potencialmente contaminantes del suelo, así como de las entidades que necesiten realizar las caracterizaciones incluidas en los estudios de calidad del suelo referidos en el art. 8.1.c. del Decreto 18/2015, así como las certificaciones de concentraciones remanentes tras una descontaminación referidas en el art. 31.1 de ese mismo Decreto, criterios y buenas prácticas que faciliten y homogenicen la ejecución de estas tareas, y aseguren unos mínimos de calidad en las investigaciones realizadas.

De acuerdo a la definición de documento reconocido contenida en el Decreto 18/2015, se trata de un documento técnico y sin carácter reglamentario, no obstante según queda reflejado en el art. 8.3 del Decreto, los estudios de calidad del suelo se llevarán a cabo conforme a los criterios recogidos en estos documentos reconocidos, y deben ser considerados igualmente para asegurar las buenas prácticas en cualquier otra actuación en materia de suelos contaminados, como las certificaciones de descontaminación, según queda recogido en la finalidad de estos documentos en el art. 54.3. Estos documentos reconocidos son además aprobados mediante resolución de la Dirección General de la Consejería de Medio Ambiente competente en materia de suelos y recogidos en el registro andaluz de documentos reconocidos en materia de suelos contaminados.

Al igual que otros documentos reconocidos, la presente guía podrá ser revisada en el tiempo en función de la normativa vigente en cada momento y con la evolución de las mejores prácticas conocidas sobre la materia.



CRITERIOS BÁSICOS

A partir de la aprobación del presente documento, los estudios de caracterización y de certificación de la descontaminación del suelo llevados a cabo en Andalucía en relación al Decreto 18/2015, correspondan a estudios reglamentarios o a actuaciones voluntarias de recuperación de suelos, deben llevarse a cabo siguiendo los principios, recomendaciones y los diferentes procedimientos recogidos en la presente guía o en cualquier otra así mismo aprobada como documento reconocido.

Cualquier desviación significativa que fuera preciso contemplar de forma excepcional, se identificará claramente en los informes de resultados en anexo independiente, y se justificará técnicamente, con indicación de las referencias documentales y bibliográficas adecuadas, para la valoración por el Órgano ambiental competente del cumplimiento de los siguientes criterios básicos:

1. Se deberá garantizar la identificación de todos los posibles contaminantes presentes, tanto en suelos como en aguas subterráneas asociadas, de acuerdo a las actividades desarrolladas que hubieran podido afectar al emplazamiento. Así mismo, se deberán determinar todos los parámetros del medio necesarios para la posterior evaluación del riesgo.
2. Se justificará la adecuación del método de ensayo empleado a los valores límite normativos.
3. La afección, en suelos y aguas subterráneas asociadas, deberá quedar acotada tanto de profundidad como en superficie.
4. Se deberán emplear procedimientos acreditados, siempre que estén disponibles en el mercado.



ÍNDICE

1. OBJETO.....	11
2. CALIDAD REQUERIDA A LOS TRABAJOS	11
3. ESTUDIOS DE CALIDAD DEL SUELO	12
4. ESTUDIOS DE CARACTERIZACIÓN	16
4.1 INVESTIGACIÓN PRELIMINAR.....	17
4.1.1 Estudio histórico del emplazamiento.....	17
4.1.2 Análisis del medio físico.....	19
4.1.3 Visita previa de campo	21
4.1.4 Modelo conceptual previo de riesgos	21
4.2 PLAN DE LA CARACTERIZACIÓN.....	22
4.3 DISEÑO DE LA CARACTERIZACIÓN EXPLORATORIA.....	23
4.3.1 Selección de los puntos de muestreo	24
4.3.1.1 Zonas sin indicio o riesgo mínimo de afección	24
4.3.1.2 Zonas con riesgo de contaminación de origen conocido	25
4.3.1.3 Zonas con posibilidad de contaminación de origen difuso o no conocido.....	26
4.3.2 Selección de las profundidades de muestreo.	28
4.3.3 Muestras simples y muestras compuestas	36
4.3.4 Muestreo de aguas subterráneas.....	37
4.4 DISEÑO DE LA CARACTERIZACIÓN DE DETALLE.....	39
4.4.1 Selección de los puntos de muestreo	40
4.4.1.1 Zonas con riesgo de contaminación de origen conocido	41
4.4.1.2 Zonas con posibilidad de contaminación de origen difuso o no conocido.....	41
4.4.1.3 Delimitación de la extensión en superficie de la contaminación	42
4.4.2 Selección de las profundidades de muestreo	44
4.4.3 Muestras simples y muestras compuestas	44
4.4.4 Plan de muestreo de aguas subterráneas	44
4.4.5 Plan de muestreo de aguas superficiales	45
4.4.6 Plan de muestreo del aire ambiente	47

4.4.7	Plan de muestreo de la fase gaseosa del suelo y la intrusión de vapores	49
4.4.7.1	Consideraciones de muestreo generales	51
4.4.7.2	Muestreo exterior	52
4.4.7.3	Muestreo junto a cimentación.....	53
4.4.7.4	Muestreo bajo cimentación.....	54
4.4.7.5	Muestreo de aire interior	56
4.4.7.6	Consideraciones de muestreo particulares en la evaluación de la intrusión de vapores a partir de depósitos subterráneos de hidrocarburos del petróleo	59
4.5	ENSAYOS ANALÍTICOS A REALIZAR EN LA CARACTERIZACIÓN.....	63
4.5.1	Selección de los parámetros analíticos	63
4.5.2	Calidad de los ensayos	65
4.5.3	Características de los métodos empleados.....	66
4.5.4	Uso de las incertidumbres de ensayo	68
4.5.5	Ensayos a contemplar para el análisis de riesgos	69
4.5.5.1	Caracterización de los hidrocarburos del petróleo (PHCs)	69
4.5.5.2	Caracterización textural del suelo.....	70
4.5.5.3	pH y Carbono orgánico	70
4.5.5.4	Piezometría.....	71
4.5.5.5	Conductividad hidráulica de la zona saturada.....	72
4.5.5.6	Otros ensayos adicionales.....	72
4.6	EVALUACIÓN DE LA CONFORMIDAD DE LOS RESULTADOS EN ESTUDIOS DE CARACTERIZACIÓN	73
4.6.1	Evaluación de la conformidad sobre la calidad de los suelos	73
4.6.1.1	Evaluación de la caracterización cuando el objeto de protección es la salud humana	73
4.6.1.2	Evaluación de la caracterización cuando el objeto de protección son los ecosistemas	75
4.6.2	Evaluación de la conformidad sobre la calidad de las aguas subterráneas.....	75
4.6.3	Evaluación de la conformidad sobre la calidad de las aguas superficiales.....	80
4.6.4	Evaluación de la calidad del aire y la fase gaseosa del suelo.....	80
5.	CERTIFICACIÓN DE LA DESCONTAMINACIÓN DE SUELOS.....	81
5.1	CARACTERÍSTICAS DE LOS INFORMES DE CERTIFICACIÓN.....	82
5.2	PLAN DE MUESTREO DE SUELOS.....	83



5.2.1	Selección de los puntos de muestreo	83
5.2.1.1	Puntos de muestreo para la certificación de huecos de excavación.....	83
5.2.1.2	Puntos de muestreo para la certificación en tratamientos “in situ” del terreno.....	85
5.2.1.3	Muestreo para la certificación de tratamientos “ex situ” del terreno	86
5.2.2	Selección de las profundidades de muestreo	87
5.2.2.1	Profundidades de muestreo para la certificación de huecos de excavación.....	87
5.2.2.2	Profundidades de muestreo para la certificación de tratamientos “in situ” del terreno.....	87
5.2.3	Muestras simples y muestras compuestas	87
5.3	PLAN DE MUESTREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES	88
5.4	PLAN DE MUESTREO DEL AIRE INTERSTICIAL DEL SUELO	89
5.5	ENSAYOS ANALÍTICOS A REALIZAR EN LA CERTIFICACIÓN	89
5.6	PERÍODO PARA REALIZAR LA CERTIFICACIÓN.....	89
5.7	EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA CERTIFICACIÓN.....	90
6.	MÉTODOS DE PERFORACIÓN.....	91
7.	INSTALACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE PIEZÓMETROS.....	96
7.1	CRITERIOS DE DISEÑO DEL PIEZÓMETRO	96
7.2	INSTALACIÓN DEL PIEZÓMETRO	100
7.3	DESARROLLO DEL PIEZÓMETRO.....	101
8.	INSTALACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE SONDAS Y POZOS DE MUESTREO DEL GAS DEL SUELO.....	102
9.	INSTALACIÓN DE CÁMARAS DE FLUJO PARA EL MUESTREO DEL GAS DEL SUELO	109
10.	TOMA DE MUESTRAS.....	110
10.1	TOMA DE MUESTRAS SÓLIDAS	110
10.2	TOMA DE MUESTRAS LÍQUIDAS.....	112
10.2.1	Purgado de piezómetros y pozos	112
10.2.2	Muestreo de piezómetros y pozos.....	114
10.3	TOMA DE MUESTRAS GASEOSAS	114



10.3.1	Toma de muestras en sondas/pozos de vapor	115
10.3.2	Toma de muestras en cámaras de flujo	115
10.3.3	Consideraciones generales	117
10.4	CUSTODIA Y CONSERVACIÓN DE MUESTRAS	117
10.5	CONTROL DE CALIDAD DEL MUESTREO	120
11.	USO Y CONTROL DE EQUIPOS	121
11.1	DETECTOR DE FOTOIONIZACIÓN (PID)	122
11.2	pHMETRO-CONDUCTIVÍMETRO	123
11.3	SONDA DE HIDRONIVEL E INTERFASE	124
11.4	ESPECTRÓMETRO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X	125
12.	REFERENCIAS	126
ANEXO:	CASO PRÁCTICO DE DISEÑO DE MUESTREO	131
A.1	Características del emplazamiento contemplado	132
A.2	Plan de muestreo exploratorio completo (clausura)	134
A.3	Plan de muestreo exploratorio en fase de actividad	141
A.4	Plan de muestreo de detalle ante un cambio de uso	145



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Flujograma de la metodología RBCA por etapas	15
Figura 2: Croquis de diferentes profundidades de interés para el muestreo	34
Figura 3: Profundidades de muestreo en torno a focos periódicamente sumergidos en zona saturada.....	35
Figura 4: Delimitación de la afección en torno a focos localizados	42
Figura 5: Delimitación de la afección en torno a zonas de afección difusas	43
Figura 6: Ubicación de PDMs en el muestreo de vapores del suelo junto a cimentación	54
Figura 7: Ubicación de PDMs en el muestreo de vapores bajo cimentación	56
Figura 8: Diseño tipo de un piezómetro	99
Figura 9: Sonda de vapor hincada de punta retráctil	103
Figura 10: Sonda de vapor en perforación bajo solera	105
Figura 11: Configuración del tren de muestreo de vapores para una prueba de fugas	108
Figura 12: Muestreo de emisiones de vapores del suelo mediante cámara de flujo	109
Figura 13: Caso práctico: diseño del muestreo exploratorio completo (clausura de la actividad)	136
Figura 14: Caso práctico: diseño del muestreo exploratorio en fase de actividad de la instalación.....	144
Figura 15: Caso práctico; diseño del muestreo detallado en parque de minerales sobre reparcelación urbana de viviendas.....	146
Figura 16: Caso práctico: diseño del muestreo detallado en cubeto de fuel sobre zona verde urbana	148



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Densidad de muestreo exploratorio en focos lineales	26
Tabla 2: Densidad de muestreo exploratorio en zonas de afección difusa	27
Tabla 3: Profundidades de muestreo según tipo de contaminación y disponibilidad equipos in situ	31
Tabla 4: Densidad de muestreo detallado en zonas de afección difusa.....	41
Tabla 5: Densidad de muestreo de vapores del suelo bajo cimentación.....	55
Tabla 6: Densidad de muestreo de vapores en el interior de edificios	57
Tabla 7: Profundidades de contaminación con escasa probabilidad para la intrusión de vapores en espacios cerrados	60
Tabla 8: Criterios EPA orientativos para la existencia de LNAPL.....	62
Tabla 9: Diferenciación habitual de TPH en fracciones alifáticas/aromáticas	69
Tabla 10: NGRs provisionales para parámetros orgánicos no contemplados en RD 9/2005	74
Tabla 11: Densidad de muestreo en certificación de fondos de huecos de excavación	83
Tabla 12: Densidad de muestreo en certificación de paredes de huecos de excavación	84
Tabla 13: Caso práctico: zonificación y justificación de PDMs en muestreo exploratorio completo (clausura)	134
Tabla 14: Caso práctico: justificación de analíticas en muestreo exploratorio completo (clausura).....	139
Tabla 15: Caso práctico: previsión de muestras por perfil.....	140
Tabla 16: Caso práctico: zonificación y justificación de PDMs en muestreo exploratorio en fase de actividad	142



1. OBJETO

El objeto del presente documento es proporcionar criterios de carácter técnico para la realización de investigaciones de suelos potencialmente contaminados.

Esta guía recoge criterios sobre las distintas fases de la investigación de los suelos y las aguas subterráneas asociadas, así como de otros medios de exposición relacionados (aire ambiente, aire del suelo, aguas superficiales...), incidiendo en aspectos relativos al plan de muestreo, métodos de perforación, instalación y acondicionamiento de piezómetros y sondas de vapor, toma de muestras, conservación de las mismas, uso y control de equipos, ensayos analíticos y evaluación de la conformidad de los resultados con la normativa vigente.

Dentro de las fases de investigación identificables, esta guía aborda en primer lugar los estudios de calidad del suelo encaminados a su valoración o no como contaminados, y más concretamente en relación con la etapa de caracterización de los mismos, ya que para la siguiente etapa del análisis cuantitativo de riesgos se deben seguir los criterios recogidos en el documento reconocido específico “Guía de evaluación de riesgos para salud humana en suelos potencialmente contaminados”.

Igualmente se recogen criterios aplicables a los estudios de certificación posteriores a los trabajos de remediación de un suelo, con objeto de evaluar las concentraciones remanentes del emplazamiento.

Este documento se realiza siguiendo los requisitos de carácter técnico y normativo establecidos en el Decreto 18/2015, de 27 de enero, por el que se aprueba el reglamento que regula el régimen aplicable a los suelos contaminados, con el objetivo fundamental de poner a disposición de los titulares de actividades potencialmente contaminantes del suelo, así como de cualquier entidad que pueda acometer trabajos de caracterización de suelos, criterios que faciliten y homogenicen la ejecución de estas tareas.

2. CALIDAD REQUERIDA A LOS TRABAJOS

Los trabajos de investigación de suelos potencialmente contaminados y aguas subterráneas asociadas, incluyendo los de certificación de los suelos remanentes tras una descontaminación, por la naturaleza de las actividades que se han de llevar a cabo, así como por la importancia y la trascendencia de sus conclusiones respecto de la normativa que han de contrastar, requieren de la aplicación de procedimientos técnicos y de gestión de una notable cualificación técnica.



Según lo contemplado en el artículo 9 del Decreto 18/2015, la entidad que realice los trabajos anteriormente citados, debe estar acreditada por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), u otro organismo de acreditación internacional que haya firmado acuerdo de reconocimiento mutuo con ésta, en base a la norma UNE-EN ISO/IEC 17020, en el ámbito de los suelos contaminados y las aguas subterráneas asociadas.

Con igual criterio, los estudios que se puedan realizar en relación con el estudio principal de la calidad del suelo de un emplazamiento, sobre la calidad de otros medios receptores de la contaminación (aire ambiente y aguas superficiales principalmente) y de exposición para los posibles receptores, deben ser llevados a cabo por entidades acreditadas para llevar a cabo estos trabajos, siempre que existan en el mercado, en base a la norma UNE-EN ISO/IEC 17020 ó 17025 según corresponda al ámbito de actuación.

Los procedimientos de las entidades acreditadas que desarrollen estos trabajos, deberán ser acordes a la metodología descrita en la presente guía, incluyendo en dichos procedimientos la necesidad de justificación técnica de las posibles desviaciones significativas, conforme a lo indicado en el apartado CRITERIOS BÁSICOS, salvo que se opte por la acreditación de procedimientos basados en otro documento reconocido aprobado en la materia.

3. ESTUDIOS DE CALIDAD DEL SUELO

Los estudios de caracterización de suelos y aguas subterráneas asociadas, junto con el análisis cuantitativo de riesgos, constituyen los estudios de calidad del suelo definidos en el art. 3 del Decreto 18/2015 de suelos contaminados de Andalucía, necesarios para evaluar la contaminación del suelo.

Estos estudios están basados en la metodología de análisis de riesgos conocida con las siglas en inglés RBCA (Risk-Based Corrective Action) desarrollada por la U.S. EPA (Environmental Protection Agency) la ASTM (American Society for Testing and Materials) para la evaluación de riesgos en emplazamientos contaminados por vertidos de sustancias químicas, y es acorde con los criterios y estándares recogidos en el Real Decreto 9/2005 para identificar y declarar los suelos contaminados.

Estos estudios se llevan a cabo normalmente por etapas, pudiendo adoptar varias fases de actuación, en las que el grado de información obtenido del emplazamiento es cada vez mayor y la incertidumbre de la evaluación de riesgos menor.



La decisión de acometer nuevas etapas de investigación depende normalmente de que los costes de dicha ampliación compensen la reducción de costes de la remediación de suelos a realizar en un emplazamiento dado, gracias a una mayor delimitación de sus suelos contaminados.

Normalmente se diferencian 3 etapas o niveles que se corresponden con los 3 niveles de análisis de riesgos que pueden llevarse a cabo: Nivel 1, Nivel 2 y Nivel 3 (Tier I, Tier II y Tier III en inglés).

El análisis de riesgos de primer nivel (Nivel 1 ó Tier I) es de tipo cualitativo y consiste en la comparación directa de las concentraciones de contaminantes detectadas en la primera caracterización del emplazamiento (caracterización exploratoria) con los Niveles Genéricos de Referencia o NGRs (en inglés Risk-Based Screening Levels ó RBSLs), válidos para todo tipo de emplazamientos, desarrollados a partir de parámetros físicos, toxicológicos y de exposición estándar, bajo hipótesis altamente conservadoras (p.ej. exposiciones junto a la fuente).

Los NGRs a aplicar quedan establecidos en el Real Decreto 9/2005 estatal y el Decreto 18/2015 de Andalucía. Además, y mientras la normativa estatal o autonómica propia no defina NGRs para estos contaminantes, podrán aplicarse igualmente de manera provisional algunos otros NGRs referidos en apartados posteriores de este documento.

La normativa española, a diferencia de la normativa EPA y ASTM de aplicación, no define NGRs o niveles equivalentes basados en niveles de riesgo para las aguas subterráneas, sin embargo, el estudio de la calidad del suelo no debe abordarse sin acometer el de sus aguas subterráneas asociadas por las interrelaciones existentes entre ambos medios, y así queda de manifiesto en el art.5 del Real Decreto 9/2005. En lugar de NGRs se emplean por tanto par la valoración de las aguas subterráneas valores umbral y normas de calidad establecidos para algunos parámetros en la normativa sectorial propia (Real Decreto 1514/2009), y complementariamente se emplean valores de la normativa holandesa basados en criterios de riesgo, que aunque no son de aplicación estrictamente legal, son una herramienta de valoración técnica ampliamente aceptada basada en los mismos principios que la metodología RBCA.

En caso de superarse los NGRs para suelos o los niveles de referencia mencionados para aguas subterráneas, es preciso avanzar al Nivel 2, llevándose a cabo entonces un análisis cuantitativo de riesgos (en adelante ACR).

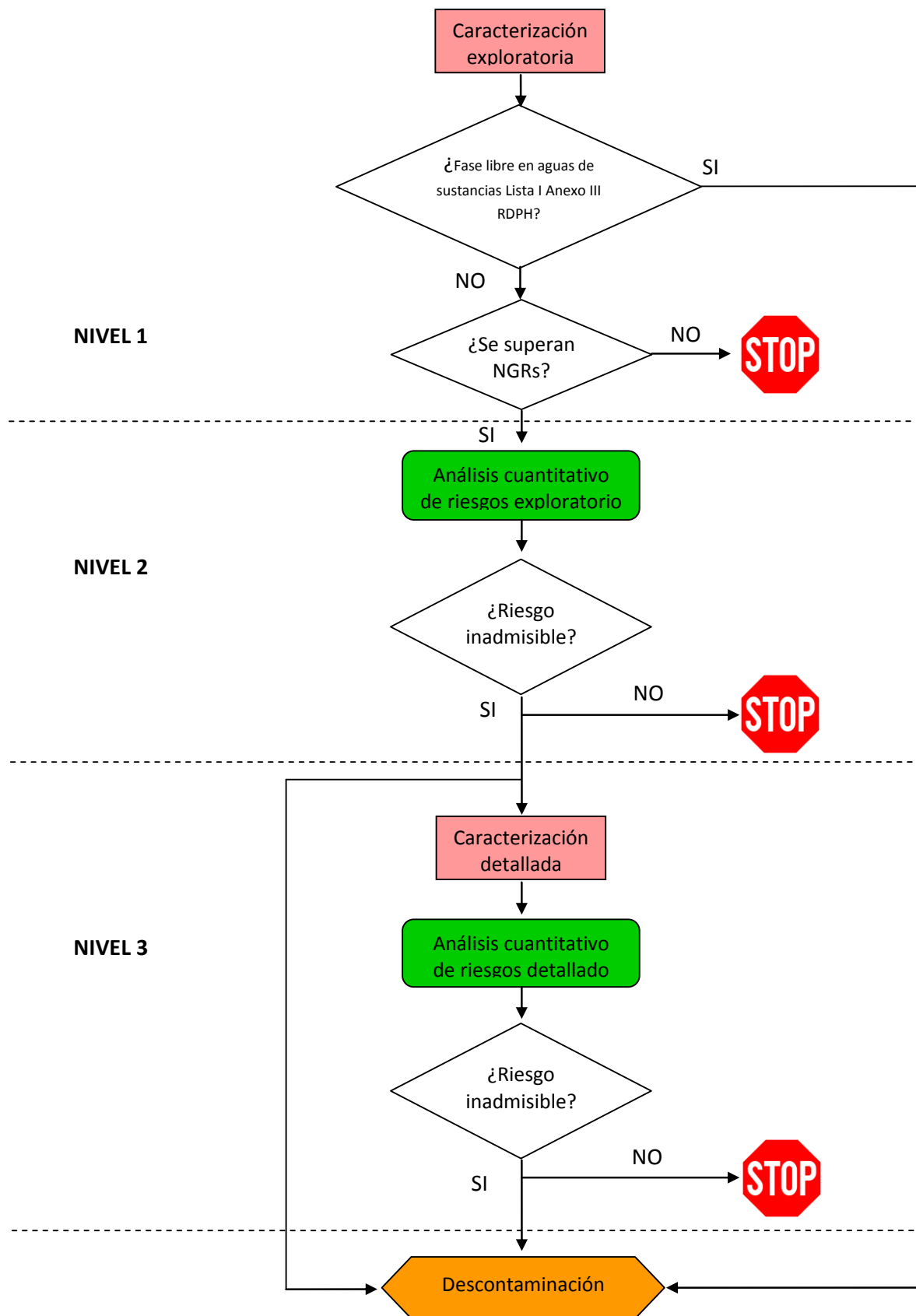
En caso de encontrarse fase libre móvil de sustancias más o menos densas que el agua subterránea, de las recogidas en la lista I del Anexo III del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (Real Decreto 849/1986 y modificación por Real Decreto 606/2003), debe no obstante procederse a la retirada de la



misma antes de continuar con el proceso de valoración RBCA, por constituir un foco primario de introducción en las aguas subterráneas de los contaminantes recogidos en dicha lista, introducción que debe impedirse en virtud del artículo 257.1 del mencionado Reglamento. Una vez retirada la fase libre se caracterizarán las concentraciones remanentes en el subsuelo y se evaluará la necesidad o no de llevar a cabo un análisis de riesgos.



Figura 1: Flujograma de la metodología RBCA por etapas



Si los riesgos calculados son inferiores a los máximos permitidos por la normativa, el suelo no está contaminado, pudiéndose llevar a cabo no obstante programas de vigilancia periódicos para contrastar la evolución de contaminantes en el emplazamiento y reevaluar sus riesgos asociados en base a los avances en el grado de conocimiento científico en la materia.

Si los riesgos calculados son superiores a los máximos permitidos, el suelo estaría contaminado y existiría por tanto obligación a su remediación por parte de los responsables identificados por los documentos normativos.

Si las incertidumbres del análisis de riesgos son elevadas, y sus conclusiones iniciales (con riesgo admisible o inadmisible) pudieran variar en función de los posibles valores que pudieran adoptar algunas variables más sensibles e influyentes, se puede no obstante llevar a cabo una ampliación de la investigación o caracterización de detalle, dirigida a obtener una medida más ajustada de dichas variables, y con ellas reevaluar los riesgos del emplazamiento llevando a cabo un nuevo análisis cuantitativo de riesgos de Nivel 3.

4. ESTUDIOS DE CARACTERIZACIÓN

Los estudios de caracterización de suelos y aguas subterráneas, ya sea en nivel 1 (exploratorio) o en nivel 3 (detallado), constituyen la parte de los estudios de calidad del suelo definidos en el art. 3 del Decreto 18/2015, encaminada a la obtención de los datos necesarios para llevar a cabo los análisis de riesgos de nivel 1, 2 ó 3.

Los estudios de caracterización exploratorios proporcionan los resultados analíticos necesarios para llevar a cabo el análisis de riesgos de nivel 1 (análisis cualitativo por comparación con NGRs), y en su caso (si se superan NGRs) igualmente los de nivel 2.

Los estudios de caracterización de detalle aportan la información necesaria para afinar el análisis de riesgos hasta el nivel 3.

La secuencia completa de la caracterización conllevaría las siguientes etapas:

- Investigación preliminar.
- Plan de la caracterización



- Caracterización exploratoria
- Caracterización de detalle

A continuación se exponen las características y contenidos de cada una de estas etapas, tomando como punto de partida las indicaciones de las normas de referencia UNE-ISO 10381-1 y 5.

4.1 INVESTIGACIÓN PRELIMINAR

La investigación preliminar, fundamentalmente de gabinete, tiene como objeto la recopilación de cuanta información haya disponible sobre el emplazamiento, en base a la cual proceder al diseño más eficiente posible de las posteriores etapas de la caracterización. Se compone normalmente de los siguientes capítulos:

- Estudio histórico.
- Análisis del medio físico.
- Visita de campo.
- Establecimiento de un modelo conceptual previo de riesgos.

La etapa subsiguiente será la realización, en base a los resultados de esta etapa previa, del plan de inspección y muestreo de la investigación, exploratoria o de detalle, según los casos.

La entidad que realiza la caracterización debe realizar un informe que recoja la información recopilada y las conclusiones obtenidas del estudio, que puede ser específico para esta etapa, o bien integrarse en el plan de inspección y muestreo, pero en todo caso, realizado con carácter previo a las campañas de muestreo en campo.

Este informe podrá ser solicitado por el órgano competente en la tramitación del procedimiento de calidad del suelo o de los servicios de inspección competentes en materia de suelos contaminados, así como por el organismo de acreditación en su labor de auditoria.

4.1.1 Estudio histórico del emplazamiento

Se recopilará cuanta información haya disponible para la descripción de las características del emplazamiento y su evolución histórica. La naturaleza de esta información varía según el tipo de emplazamiento considerado (industrial, urbano, vertederos, etc.), aunque típicamente, son datos a recopilar:



- Procesos industriales llevados a cabo: materias primas, tratamientos, residuos y productos finales.
- Composición química de materias primas, productos y residuos, especialmente los de naturaleza peligrosa o que pudieran haber afectado por lixiviación a los suelos. Tipo de combustibles (gasolina, gasoil, fuel, etc.) empleados en cada zona de la instalación.
- Lugares de almacenamiento de materias primas, productos y residuos, especialmente los de naturaleza peligrosa o que pudieran haber afectado por derrames a los suelos.
- Características de estos almacenamientos: en superficie, tipo de pavimentación y cubierta, depósitos aéreos o subterráneos, cubetos de seguridad, pruebas de estanqueidad realizadas, antigüedad de los mismos, etc.
- Características de las zonas de proceso y auxiliares: pavimentación, redes de drenaje, cubiertas, calderas, transformadores y naturaleza de sus aceites dieléctricos, cubas de deposición, talleres mecánicos, fosos, etc.
- Tuberías de distribución de materias primas, residuos y productos: aéreas o subterráneas, recorrido, antigüedad, pruebas de estanqueidad, etc.
- Vías de transporte empleadas: carreteras, caminos, vías de ferrocarril, etc.
- Aguas residuales: tratamiento y lugar y forma de vertido.
- Accidentes o incidentes de los que exista constancia el vertido de sustancias contaminantes al suelo o las aguas subterráneas: fugas de tuberías o depósitos, derrames, incendios, etc.
- Planos de las instalaciones
- Sucesión cronológica de ortofotografías del emplazamiento.

Parte de esta información puede ser extraída de los datos existentes de la instalación en el inventario andaluz de suelos potencialmente contaminados, o del informe de situación histórico en caso de cambio de actividad o uso, que habrá que revisar y contrastar. Habrá que completar dicha información, no obstante, con la correspondiente a períodos de explotación del emplazamiento anteriores a los reflejados en dicho inventario. Se podrá emplear para ello fotografía histórica con el fin de realizar un análisis cronológico de los usos pasados que pudieran haber afectado la calidad del suelo.

Otras fuentes de búsqueda de esta información pueden ser autorizaciones ambientales de la/s actividad/es llevada/s a cabo en el emplazamiento, el Registro Industrial, los registros municipales existentes para concesión de licencias, entrevistas con antiguos trabajadores, etc.

Como conclusión de esta etapa, se debe obtener al menos:



- Una zonificación del emplazamiento en base al riesgo previsible de encontrar afección en los suelos
- Las características de los posibles contaminantes que puedan encontrarse, y por tanto, de los posibles parámetros analíticos a determinar en las investigaciones posteriores.
- La ubicación precisa o no de los focos contaminantes, y por tanto de la distribución localizada o difusa de la posible afección.
- Profundidad a la que cabe esperar la contaminación, que determinará los métodos de perforación a emplear más adecuados, así como la profundidad de perforación.

Para identificar los posibles contaminantes presentes en una instalación, y sobre todo si la calidad de la información previa recopilada puede tener algunas lagunas, también puede hacerse uso de información genérica existente para el sector de actividad industrial aplicable, como por ejemplo la de las siguientes fuentes:

- Documentos BREF (Best available techniques reference) para cada sector industrial publicados en la web del Joint Research Centre de la U.E. (<http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/>) así como las Guías MTD (Mejores Técnicas Disponibles) publicadas en la web del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (<http://www.prtr-es.es/documentos/documentos-mejores-tecnicas-disponibles>).
- Anexo B de la norma UNE-ISO 15800:2003. Calidad del suelo. Caracterización de los suelos respecto a la exposición de las personas.
- Tabla 1 del Anexo C de la norma UNE-ISO 15176:2002. Calidad del suelo. Caracterización de suelo excavado y otros materiales del suelo para su reutilización.
- Anexo II de la Guía Metodológica IHOBE de Investigación de la contaminación del suelo . Análisis Químico.
- Industry Sector Notebooks de la U.S. EPA. (localizables en www.epa.gov/nscep)

4.1.2 Análisis del medio físico.

En primer lugar se hará una recopilación de la información existente para una adecuada descripción del medio físico donde se ubica el emplazamiento. En particular:

- Contexto geográfico-administrativo: municipio (o municipios en caso de que el emplazamiento se encuentre en más de uno), cercanía a núcleos permanentes u ocasionales de población, superficie total del emplazamiento y de las diferentes zonas diferenciadas, división administrativa del emplazamiento en parcelas registrales y/o catastrales con indicación de sus usos actuales, posibles



usos futuros en función del planeamiento vigente o en elaboración.

- Contexto geológico: dominio geotectónico al que pertenece, litologías del MAGNA 1:50.000 bajo el emplazamiento y en el entorno próximo, litologías concretas encontradas bajo el emplazamiento a un mayor nivel de detalle en otros estudios previos disponibles (estudios geotécnicos, catas, etc.).
- Hidrogeología: ubicación o cercanía a masas de aguas subterráneas definidas por el Plan Hidrológico de la cuenca donde se ubique el emplazamiento, la permeabilidad general atribuida a la zona y geometría de líneas isopiezas en la cartografía a gran escala (1:200.000) del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), existencia de información a un mayor nivel de detalle (profundidad del nivel piezométrico, sentido del flujo subterráneo, etc.) en el Sistema de Información de Aguas Subterráneas (SIAS) de Andalucía, o en otros estudios previos disponibles tales como estudios geotécnicos o proyectos para legalización de pozos,
- Existencia en las cercanías de pozos de captación, p.ej. a partir del inventario de putos de agua del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), así como de cursos superficiales de agua o vías preferentes de escorrentía (antiguas arroyadas, etc.).
- Espacios naturales protegidos: ubicación o cercanía a espacios protegidos por su valor paisajístico o ecológico (espacios naturales protegidos, lugares de interés comunitario (LIC), Zonas de especial protección para las aves (ZEPA), etc., y en su caso, tipo de especies o elementos que le confieren valor al espacio.

Como conclusión de esta etapa, se debe tener una noción clara de:

- La categoría de los Niveles Genéricos de Referencia (NGR) que cabe aplicar en el estudio según sus usos actuales y futuros, y la existencia o ausencia de valores ecológicos susceptibles de verse afectados.
- La magnitud de las zonas a investigar para la posterior selección de mallas de muestreo representativas.
- La facilidad o dificultad que cabe esperar para la perforación del terreno con los diferentes métodos disponibles.
- La existencia de zonas y de niveles en profundidad en los que es previsible una acumulación preferente de algunos contaminantes (por la dirección del flujo subterráneo, la dirección de la escorrentía, franja de oscilación del freático, niveles impermeables, etc.).
- Existencia o ausencia de aguas subterráneas susceptibles de estar siendo afectadas por una posible contaminación del suelo, y profundidad estimada de las mismas, lo que determinará su incorporación al plan de muestreo.
- Identificación de las vías de migración posibles para la contaminación, y los posibles receptores de la



misma.

4.1.3 Visita previa de campo

Durante la investigación preliminar, se realizará al menos una visita al emplazamiento, para contrastar la información recopilada, y recabar información de utilidad para posteriores etapas de la caracterización:

- Existencia de otros usos no contemplados (recreativos, etc.)
- Existencia de núcleos de población o elementos de interés no advertidos por la antigüedad de la cartografía existente.
- Estado de conservación general de las instalaciones (depósitos, cubetos, pavimento, etc.), y adecuación a la información existente en el inventario andaluz de suelos potencialmente contaminados.
- Presencia de apilamientos o rellenos en superficie de residuos.
- Indicios visuales y organolépticos de contaminación.
- Presencia o ausencia de vegetación en terrenos baldíos.
- Inspección visual del aspecto de las aguas superficiales existentes.
- Localización de pozos de captación no inventariados.
- Comprobación del nivel freático en pozos preexistentes. Inspección del estado de conservación de estos pozos, sus detalles constructivos, y el aspecto de sus aguas (coloración, olores, fase libre, etc.).
- Presencia de focos contaminantes en las parcelas colindantes, o al contrario, indicios de afección a las mismas desde el emplazamiento.
- Facilidad o dificultad de accesos de maquinaria para una etapa posterior de toma de muestras
- Autorizaciones necesarias para el acceso a las instalaciones.
- Precauciones de seguridad a tener en cuenta durante las perforaciones: tendidos eléctricos, taludes, equipos de protección individual (EPI's) a emplear, etc.
- Existencia y localización de infraestructuras subterráneas (luz, agua, saneamientos, telefonía, etc.) a respetar durante las perforaciones.
- Puntos de agua potable y electricidad disponibles para la realización de los muestreos.

4.1.4 Modelo conceptual previo de riesgos

Con toda la información disponible se debe realizar un modelo conceptual previo de riesgos del emplazamiento, o de cada una de las zonas diferenciadas dentro de éste, con objeto de que el posterior plan de muestreo contemple:

- La delimitación y caracterización de todos los focos potenciales de contaminación



- La toma de datos de campo necesarios para una adecuada modelización de la migración de la contaminación por las diferentes vías existentes, y una adecuada estimación de la concentración de los contaminantes en el punto de exposición.

A este respecto se deben consultar los datos de partida necesarios recogidos en el documento reconocido “Guía de evaluación de riesgos para salud humana en suelos potencialmente contaminados”.

- La medida directa de la concentración de contaminantes en el punto de exposición, cuando sea factible y representativo del escenario considerado.
- Todos los posibles receptores, y por tanto, todos los posibles puntos de exposición.
- Deben valorarse los riesgos existentes para los operarios de las investigaciones posteriores, así como los posibles riesgos para el medio ambiente por la realización de estas investigaciones: apertura de vías de migración nuevas (hacia las aguas subterráneas), contaminación de aguas superficiales, molestias a especies sensibles, etc.

4.2 PLAN DE LA CARACTERIZACIÓN

Las conclusiones de la etapa anterior se trasladarán al diseño concreto de la investigación de la calidad del suelo a acometer. En la mayoría de los casos comenzará con el nivel básico (caracterización exploratoria), aunque por razones de urgencia, o por las evidencias de afección acumuladas en la etapa previa, es posible acometerlo de partida con un mayor grado de detalle (caracterización de detalle).

Existen una serie de hitos a contemplar en cualquier planificación de una caracterización de suelos, al objeto de reducir al mínimo las improvisaciones, y que el resultado obtenido en la investigación se adecúe al objetivo perseguido:

- Fechas previstas para los trabajos
- Personal interviniente en las diferentes fases del trabajo
- Localización de los puntos de muestreo seleccionados para cada matriz a investigar (suelos, aguas subterráneas, otros medios, etc.).
- Justificación técnica de la disposición de dichos puntos (en base a las conclusiones de la investigación preliminar)
- Profundidades estimadas de las perforaciones necesarias
- Criterios de diseño a priori de los piezómetros a instalar
- Número de muestras a tomar en cada perfil y profundidades estimadas a priori como idóneas, o criterios en los que se basará su selección.



- Método de perforación a emplear
- Procedimientos técnicos de la entidad que es necesario aplicar para cada caso concreto.
- Ensayos “in situ”
- Equipos de toma de muestra y de medida necesarios.
- Volúmenes de muestra necesarios para la analítica solicitada.
- Botellería a emplear para la recogida de muestras.
- Material auxiliar necesario
- Condiciones de preservación y conservación a conseguir durante la custodia de las muestras
- Normativa y límites normativos a aplicar. Valores de referencia
- Ensayos analíticos de laboratorio necesarios y rangos de medida especiales requeridos para emitir adecuación a esos límites normativos.
- Subcontrataciones necesarias: empresa de perforaciones, laboratorios de ensayo, topografía,....
- Controles de calidad
- Medidas de prevención de riesgos laborales.
- Medidas de prevención ambiental a tener en cuenta.

La entidad que realiza la caracterización deberá realizar un informe previo a las campañas de muestreo en campo que recoja el plan de muestreo elaborado. Este informe podrá ser solicitado por el órgano competente en materia de suelos contaminados, así como por el organismo de acreditación en su labor de auditoria.

Algunos de estos apartados será necesario matizarlos o modificarlos en campo en función de las observaciones realizadas durante las perforaciones, en cuyo caso se realizará por personal técnico especializado, dejando constancia de su justificación en los correspondientes registros de la entidad.

A continuación se ofrecen instrucciones diferenciadas a considerar para el diseño del muestreo en investigaciones exploratorias y de detalle.

4.3 DISEÑO DE LA CARACTERIZACIÓN EXPLORATORIA

El objetivo del estudio de caracterización exploratoria es conocer la posible afección o no de los suelos de un emplazamiento, tomando como marco de referencia las zonas de la instalación que poseen riesgo de contaminación, sin tratar de delimitar por completo la extensión de dicha afección, pero identificando los diferentes contaminantes presentes y el orden de magnitud de las concentraciones analíticas esperables.



En base a sus resultados se llevará a cabo el ACR de Nivel 2, a partir de cuyas conclusiones se decidirá o no la necesidad de remediación del emplazamiento, por lo que el diseño de muestreo ha de ser completo y contemplar todas las posibles zonas de afección del emplazamiento, tratando de caracterizar en cada una de ellas las ubicaciones a priori más desfavorables.

4.3.1 Selección de los puntos de muestreo

Se contemplarán diferentes medidas de diseño para la selección de puntos de muestreo, dependiendo del riesgo de afección que presenten, y de que el origen de la posible afección sean fuentes conocidas, o bien, éste no sea claro y localizable (esto es, zonas con posible contaminación difusa).

4.3.1.1 Zonas sin indicio o riesgo mínimo de afección

Estas zonas se corresponden normalmente con áreas de la instalación en las que exista certeza de que en ningún momento se ha desarrollado algún tipo de actividad potencialmente contaminante del suelo.

Podrán estar exentas de estudio analítico, aunque para ello deberán ser claramente delimitadas y en el informe de caracterización se acompañará la información necesaria (extracto de la memoria y/o planos del proyecto, fotografía aérea multitemporal suficientemente nítida y aclaratoria, etc.) para corroborar que los usos soportados desde el inicio de la actividad han sido los mencionados anteriormente.

De existir alguna duda de que, debido a otros usos anteriores, o por actividades limítrofes que puedan haber ocasionado vertidos, derrames y su posterior escurrimiento, exista cierto grado de afección, o al menos no se pueda garantizar que nunca hayan presentado riesgo de contaminación, estas zonas deberán tener representación en el plan de muestreo del emplazamiento, aunque se permitirá que inicialmente posean una densidad de muestreo considerablemente inferior, que no tendrá que ser incrementada de confirmarse en estos primeros análisis la ausencia de afección.

Así por ejemplo, se ha de ser precavido con las campas de terreno sin pavimentar, en la actualidad o en épocas pasadas, especialmente en emplazamientos de cierta antigüedad, debido a la existencia de malas prácticas (p.ej. enterramientos de residuos) en momentos históricos donde no existía una conciencia ambiental adecuada.

En estas zonas se dispondrá un número de PDMs equivalente aproximadamente al 30% de los reflejados para zonas de contaminación de origen difuso (redondeando al alza), seleccionando ubicaciones en función de la heterogeneidad del área, posibles arrastres de contaminación de otras áreas, etc.

Si los resultados de estos puntos de muestreo denotan concentraciones superiores a los NGRs, debe



rechazarse la hipótesis inicial de ausencia de afección, e incorporar la zona de nuevo al plan de muestreo considerando su contaminación de origen difuso.

4.3.1.2 Zonas con riesgo de contaminación de origen conocido

Se seleccionarán como puntos de muestreo, las zonas de la instalación donde a partir de la investigación preliminar, se deduzca la existencia actual o pasada de elementos localizables de la actividad con posibilidad de afectar la calidad de los suelos y aguas subterráneas con sustancias o productos de degradación tóxicos. Se consideran por ejemplo:

- Lugares de almacenamiento, en superficie mediante depósitos aéreos y especialmente en depósitos subterráneos, de materias primas, productos y residuos, que pudieran haber afectado a los suelos por fugas y/o derrames.
- Bocas de carga de los depósitos desplazadas de éstos.
- Zonas de proceso y auxiliares concretas, en las que se hayan manipulado o tratado estas sustancias (cabinas de pintura, fosos, transformadores, etc.).
- Tuberías de distribución de materias primas, productos o residuos, especialmente las subterráneas, o aéreas sobre terrenos sin pavimentación actual o pasada.
- Arquetas de recogida de aguas residuales, pluviales contaminadas o residuos, separadores de hidrocarburos, fosas sépticas, etc.
- Zonas en las que conste se hayan producido accidentes o incidentes de tipo ambiental.

La entidad deberá estudiar cualquier otra zona del emplazamiento que presente un claro riesgo o evidencias de afección a los suelos, incluyendo los límites de la parcela, si se tuviera información o se sospechara la afección a parcelas colindantes.

Cada foco de riesgo identificado (p.ej. cada depósito), deberá contar como mínimo con un punto de muestreo, ubicado a ser posible en una zona central de la misma, o ligeramente desplazado hacia el punto donde se identifiquen signos de posible afección o se prevea la propagación de un posible derrame hacia los suelos y/o las aguas subterráneas, es decir, a priori aguas abajo en el sentido de la escorrentía y/o del flujo subterráneo, a menos que se tenga información previa de que la propagación sea posible en otras direcciones (p.ej. por condicionantes geológicos), a una distancia no superior a cinco metros.

Cuando el foco de contaminación fuera una estructura de dimensiones significativas (piscina, laguna, cubeto, etc.), el número de puntos de muestreo a ubicar sobre la estructura y en el perímetro de ésta, será igual o mayor al que la que correspondería a una superficie de iguales dimensiones con origen de



contaminación difusa, según lo indicado en el apartado siguiente.

Cuando el foco de contaminación sea una estructura lineal, como por ejemplo una tubería aérea o subterránea de distribución, se dispondrán puntos de muestreo sucesivos cada cierta distancia, siguiendo la traza en planta de la conducción (para tuberías desmanteladas) o ligeramente desplazadas de la misma a un lado y a otro de forma alterna (para tuberías en uso).

Además del punto inicial y final de la conducción, posiblemente ya contemplados dentro del muestreo de algún foco conocido (bocas de carga, depósitos, etc.) se adoptarán igualmente puntos de muestreo en ubicaciones intermedias de la misma, teniendo en cuenta las siguientes reglas:

Tabla 1: Densidad de muestreo exploratorio en focos lineales

Longitud de la tubería (m)	Distancia entre puntos intermedios de control (m)	Nº puntos de muestreo
≤ 50	25	3
100	33	4
250	60	5
500	100	6
1000	150	8
2500	200	14
5000	250	21
10000	300	34
20000	350	58

Para longitudes de tubería intermedias a las reflejadas en la siguiente tabla, se tomará una distancia entre puntos de muestreo proporcional, por interpolación lineal, entre los correspondientes a una longitud de tubería menor y mayor a la dada.

4.3.1.3 Zonas con posibilidad de contaminación de origen difuso o no conocido

Estas zonas se corresponden con áreas de la instalación donde se han llevado a cabo actividades de proceso principales o actividades auxiliares, pero en las cuales no cabe identificar a priori puntos concretos con mayor riesgo de afección. Como por ejemplo:

- Áreas de proceso en general.
- Rutas de transporte sin pavimentación actual o pasada.
- Campas anexas a las naves de proceso sobre las que se haya llevado a cabo algún tipo de actividad

Se delimitarán en el emplazamiento cada una de las áreas de estas características que cabe identificar, debiendo poseer unas características similares dentro de las mismas, es decir, no se deben contabilizar juntas áreas de diferente naturaleza.



En cada una de estas zonas se dispondrá una malla de muestreo, que sin pretender que sea rígida, se asemejará a una red de muestreo sistemática o regular, de tipo cuadrada o triangular, con un espaciado entre puntos próximos más o menos constante.

La densidad de la malla de muestreo diseñada deberá ser técnicamente justificada, pudiendo adoptar como densidad mínima, la de la siguiente regla:

Tabla 2: Densidad de muestreo exploratorio en zonas de afección difusa

Superficie (Ha)	Nº puntos muestrales	Superficie (Ha)	Nº puntos muestrales
? 0,03	1	7,5	16
0,06	2	10	19
0,1	3	15	25
0,25	3	20	33
0,5	4	25	42
0,75	4	30	50
1	5	35	58
2	6	40	67
3	8	45	75
4	10	50	83
5	12	60	100

Para superficies intermedias a las reflejadas en la siguiente tabla, se tomará un número de puntos proporcional, por interpolación lineal, entre los correspondientes a una superficie menor y mayor a la dada.

Alternativamente, se podrán proponer otras densidades de muestreo para estas zonas, que estén debidamente justificadas y extraídas de normas técnicas de reconocido prestigio en la investigación de suelos (como normas UNE, ISO, EPA, ASTM), que se adoptarían igualmente en su caso como documentos reconocidos.

En zonas de proceso en funcionamiento donde existan obstáculos para el acceso de la maquinaria necesaria para la realización de las perforaciones (p.ej. naves cerradas, interior de cubetos), se podrá obviar temporalmente el muestreo siempre y cuando no existan evidencias de posible afección (vapores, olores, contaminación en piezómetros anexos aguas abajo, etc.). Esta exclusión del muestreo deberá ser reflejada y justificada de forma clara en el correspondiente informe, reflejando la necesidad de acometerlo en caso de remodelación o clausura de la actividad. Siempre se procurará no obstante incorporar al plan de muestreo aquellos focos conocidos de posible afección incluidos dentro estas zonas de proceso, especialmente si se trata de depósitos de sustancias potencialmente contaminantes del suelo.

4.3.2 Selección de las profundidades de muestreo.

Como norma general, siempre se tomará una muestra superficial dentro de los primeros 30 cm aproximadamente (excluyendo pavimentación), por ser la superficie una de las zonas con mayor riesgo a recibir posibles vertidos o derrames. No obstante, podrán hacerse excepciones técnicamente justificadas, en aquellos casos en que se puedan aportar evidencias de que no existe afección en dicho nivel (p.ej. mediante medidas in situ o por existir rellenos recientes con tierras de préstamo traídas de otras ubicaciones y testada en algún PDM de la investigación, etc.).

En el resto del perfil se tomarán muestras en los siguientes niveles de interés:

- En cada horizonte litológico natural o relleno antrópico que sea claramente diferenciable: intervalos de la columna de suelo que presenten contrastes netos de granulometría, color, competencia, homogeneidad interna, etc..

En caso que la contaminación tenga un origen de tipo exclusivamente orgánico, el muestreo se podrá ceñir a aquellos niveles que presenten algún tipo de indicio visual u organoléptico de posible afección, o se encuentre bajo algún nivel que presente indicios claros de esa posible afección.

En caso que la contaminación tenga un origen de tipo exclusivamente metálico, el muestreo se realizará, denoten posible afección o no, sobre los diferentes niveles de rellenos antrópicos existentes más el primer nivel de terreno claramente natural que posea ciertas limitaciones a la permeabilidad de los posibles lixiviados (limos y arcillas).

Cuando existan sucesiones litológicas hacia muro de materiales de mayor a menor permeabilidad, de arenas a limos o arcillas (por ejemplo el contacto entre el relleno antrópico y el terreno natural), y no existan otros indicios diferentes de posible afección, las muestras se tomarán en las zonas de acumulación preferente de contaminantes: la correspondiente a la litología de mayor permeabilidad en la base del contacto entre ambas y la muestra de la litología de menor permeabilidad en el techo del contacto con el material más permeable.

- En cualquier nivel, inclusive a diferentes profundidades dentro de un mismo horizonte, que presente indicios visuales u organolépticos claros de posible afección y/o la acumulación de residuos (escombros, plásticos, restos minerales, cenizas, escorias, etc.).

Se entenderá por nivel con indicios claros cualquier nivel de la columna de sondeo con coloraciones



anómalas o destacables del resto, así como evidencias organolépticas aunque no sean muy marcadas.

- Cuando los puntos de muestreo se dispongan alrededor de algún foco enterrado de posible afección (p.ej. depósitos subterráneos o tuberías enterradas), se tomará una muestra en un intervalo de profundidad bajo la base del foco (aprox. 2 m o menor en función de la proximidad al mismo). En caso que la contaminación tenga un origen de tipo exclusivamente orgánico, el muestreo se podrá ceñir a aquellos niveles que presenten algún tipo de indicio visual u organoléptico de posible afección.
- Cuando los posibles contaminantes a detectar sean hidrocarburos u otros contaminantes inmiscibles y menos densos que el agua, se tomará una muestra en la franja de oscilación del nivel piezométrico, ya que suele ser un lugar de acumulación de este tipo de contaminantes, los cuales tienden a formar una fase líquida no acuosa ligera (LNAPL) sobre el piezométrico, que lo acompaña durante sus ascensos y depresiones impregnando esa franja de terreno.
- En aquellos casos en que el punto de muestreo se disponga alrededor de algún foco de posible afección (p.ej. depósitos subterráneos) que se encuentre parcial o totalmente sumergido bajo el nivel freático, deberá tomarse una muestra a la altura de la base del mismo, o a diferentes profundidades si se trata de un foco menos localizado (p.ej. rellenos antrópicos potentes), aun cuando haya de realizarse en zona saturada, con la consiguiente aportación, normalmente menos significativa, de la fase disuelta retenida en la muestra. Se dejará constancia de la pertenencia a zona saturada de estas muestras en el correspondiente informe.

Estas muestras podrían ser necesarias para llevar a cabo un ACR conservador en caso que las posibles fluctuaciones del nivel freático no estén bien estudiadas, ya que la afección que en un determinado momento se ubica en zona saturada, puede quedar ubicada en zona no saturada en momentos o períodos con depresión del nivel freático (ver figura 3).

También son de utilidad para estimar otros parámetros necesarios para dicho ACR como el espesor de la pluma de zona saturada afectada en caso de que no se disponga de piezómetros específicos ranurados a mayor profundidad, como suele ser el caso de una investigación exploratoria.

- Cuando los posibles contaminantes a detectar sean compuestos orgánicos más densos que el agua (p.ej. organoclorados) y existan en profundidad niveles de litologías más impermeables, bien sean lentejones de limitada extensión o formaciones de mayor escala que funcionen como base del acuífero, se tomarán muestras tanto en la base del material más permeable como en el techo del nivel impermeable, aun cuando deba realizarse en zona saturada, ya que suelen ser lugares de acumulación de este tipo de contaminantes, donde tienden a formar una fase líquida no acuosa



pesada (DNAPL). Con independencia de ello, puede ser igualmente necesario tomar alguna muestra en alguna profundidad intermedia en la que se intercepte la ruta de migración de estos compuestos, y se pueda detectar dicha DNAPL en forma residual.

En cualquier caso, con objeto de delimitar en profundidad la extensión de la contaminación del suelo en la zona no saturada (excluyendo franja de oscilación del freático), la muestra tomada a mayor profundidad no debería arrojar resultados analíticos superiores a los niveles normativos de aplicación en la evaluación del estudio correspondiente, de acuerdo con el apartado de “Evaluación de los resultados en estudios de caracterización”. De prever que ello no sea así, se seguirán tomando sucesivas muestras a mayor profundidad.

El número de muestras a tomar en profundidad dentro de cada perfil podrá reducirse si se aportan evidencias mediante la utilización de equipos de medida “in situ”, de que no existe afección en los niveles de muestreo recomendados anteriormente. Los equipos de medida “in situ” deberán ser apropiados a los contaminantes previstos en el plan de muestreo, por ejemplo, medidas con detector por fotoionización portátil (PID) para hidrocarburos y compuestos orgánicos volátiles, medidas con detectores de fluorescencia de rayos X (XRF) para metales, etc.

En la siguiente tabla se relacionan los diferentes niveles de profundidad de interés para el muestreo que pueden presentarse en un perfil cualquiera y que han sido comentados con anterioridad, con los diferentes tipos de contaminación que cabe identificar teniendo en cuenta la naturaleza de las sustancias involucradas (orgánica volátil, orgánica semivolátil y no volátil, más metálica) y su facilidad para ser evaluada mediante observaciones visuales y organolépticas y/o medidas in situ.

En líneas generales la contaminación orgánica será más fácil de identificar visual y organolépticamente que la metálica, al menos en los niveles de concentración en que algunos metales comienzan a ser problemáticos. Dentro de la contaminación orgánica, los compuestos volátiles, aunque su muestreo sea más complejo, serán más fáciles de identificar que los semivolátiles o no volátiles, tanto organolépticamente como mediante medidas in situ (PID). Respecto a las medidas in situ que pueden realizarse, la determinación por XRF permite medidas cuasi cuantitativas para algunos metales con un nivel de selectividad mucho mayor que otro tipo de medidas.

En cada caso de contaminación, y según se disponga o no de equipos adecuados a la misma, la tabla sintetiza cuándo procedería o no el muestreo de cada nivel, y si dicho muestreo sería obligado o podría quedar condicionado al resultado de los ensayos in situ y/o la testificación de las evidencias visuales y



organolépticas. A pie de tabla se ofrecen mayores aclaraciones al respecto.

En las figuras siguientes se indican de manera gráfica algunos ejemplos de los diferentes niveles de profundidad de interés para el muestreo enumerados en la tabla.

Tabla 3: Profundidades de muestreo según tipo de contaminación y disponibilidad equipos in situ

		Tipo de afección posible					
		Mezclas de HCs y VOCs halogenados y no halogenados		Aceites minerales y SVOCs no detectables por PID (Plaguicidas, etc.)		Metales	
Profundidades de interés		Con PID	Sin PID	Con Turbidímetro, kits, etc	Sin equipos	Con equipo XRF	Sin equipo XRF
1	Nivel superficial	Según PID/IVO	SI	Según equipos	SI	Según XRF	SI
2	Niveles litológicos o rellenos diferenciados	Según PID/IVO	Si existen IVO (1 por nivel)	Según equipos	Si existen IVO (1 por nivel)	Según XRF	SI (1 por nivel)
3	Niveles con indicios visuales u organolépticos (IVO) de posible afección	Según PID/IVO	SI (1 por nivel)	Según equipos	SI (1 por nivel)	Según XRF	SI (1 por nivel)
4	Nivel algo más profundo que foco subterráneo de posible afección	Según PID/IVO	Si existen IVO	Según equipos	Si existen IVO	Según XRF	SI
5	Muestra de cierre ≤ NGRs en ZNS	SI	SI	SI	SI	Según XRF	SI
6	Franja oscilación nivel freático	Según PID/IVO	SI	Según equipos	SI	NO	NO
7	Nivel junto a foco de posible afección en zona saturada	Según PID*/IVO	Si existen IVO	Según equipos	SI	Según XRF	SI
8	En base impermeable en profundidad	Según PID*/IVO	Si existen IVO	NO	NO	NO	NO
Observaciones		A	B	A	B	C	D

* Medidas orientativas sobre el testigo si la humedad no permite una medida más apropiada.

IVO: indicios visuales u organolépticos

HC: Hidrocarburos

VOCs: Compuestos orgánicos volátiles

SVOCs: Compuestos orgánicos semivolátiles

ZNS: Zona no saturada

- A. Se tomará una muestra según los máximos resultados in situ obtenidos en el perfil si éstos son



superiores al fondo habitual (humedad, etc.), o en su defecto según posibles indicios visuales u organolépticos, más una segunda muestra que sirva para delimitar en profundidad la afección que pueda encontrarse en la primera muestra.

En presencia de aguas subterráneas se tomarán muestras adicionales en la franja de oscilación del freático y en los puntos de interés de la zona saturada si procede en función de los resultados in situ y/o los indicios visuales u organolépticos.

Si los resultados in situ no son significativos y relativamente homogéneos en todo el perfil, y tampoco existen evidencias organolépticas, se tomará una única muestra en aquella ubicación que se prevea con mayores concentraciones (normalmente superficial o sobre el freático).

Mínimo 1 muestra.

- B. Se tomará al menos una muestra en superficie y en cualquier nivel intermedio de los contemplados que muestre algún indicio visual u organoléptico de posible afección, más una muestra de cierre que sirva para delimitar en profundidad la afección que pueda encontrarse en las anteriores. En presencia de aguas subterráneas se tomarán muestras adicionales en la franja de oscilación del freático y en los puntos de interés de la zona saturada si procede en función de los indicios visuales u organolépticos.

Mínimo 2 muestras (3 muestras en presencia de aguas subterráneas), más las correspondientes a cada nivel intermedio con indicios.

- C. Se tomará una primera muestra según los máximos resultados XRF obtenidos en el perfil, más una segunda muestra que sirva para delimitar en profundidad la afección que pueda encontrarse en la primera muestra. Si los resultados no son significativos y relativamente homogéneos en todo el perfil se tomará una única muestra en aquella ubicación que se prevea con mayores concentraciones (normalmente superficial).

Mínimo 1 muestra.

- D. Se tomará una muestra superficial y en cada nivel litológico o de rellenos diferenciable, así como en cualquier nivel intermedio de interés de los contemplados (denoten o no posible afección), más una muestra de cierre que sirva para delimitar en profundidad la afección que pueda encontrarse en las anteriores.

Mínimo 2 muestras más las correspondientes a cada nivel litológico diferenciable y cada nivel intermedio aplicable.

Las muestras tomadas para metales no tienen siempre por qué coincidir con las muestras tomadas para la determinación de compuestos orgánicos si la localización de la fuente de la posible afección difiere para ambos tipos de contaminantes. O lo que es lo mismo, la batería analítica planificada no ha de ser completa de forma sistemática en todas las muestras de un perfil.

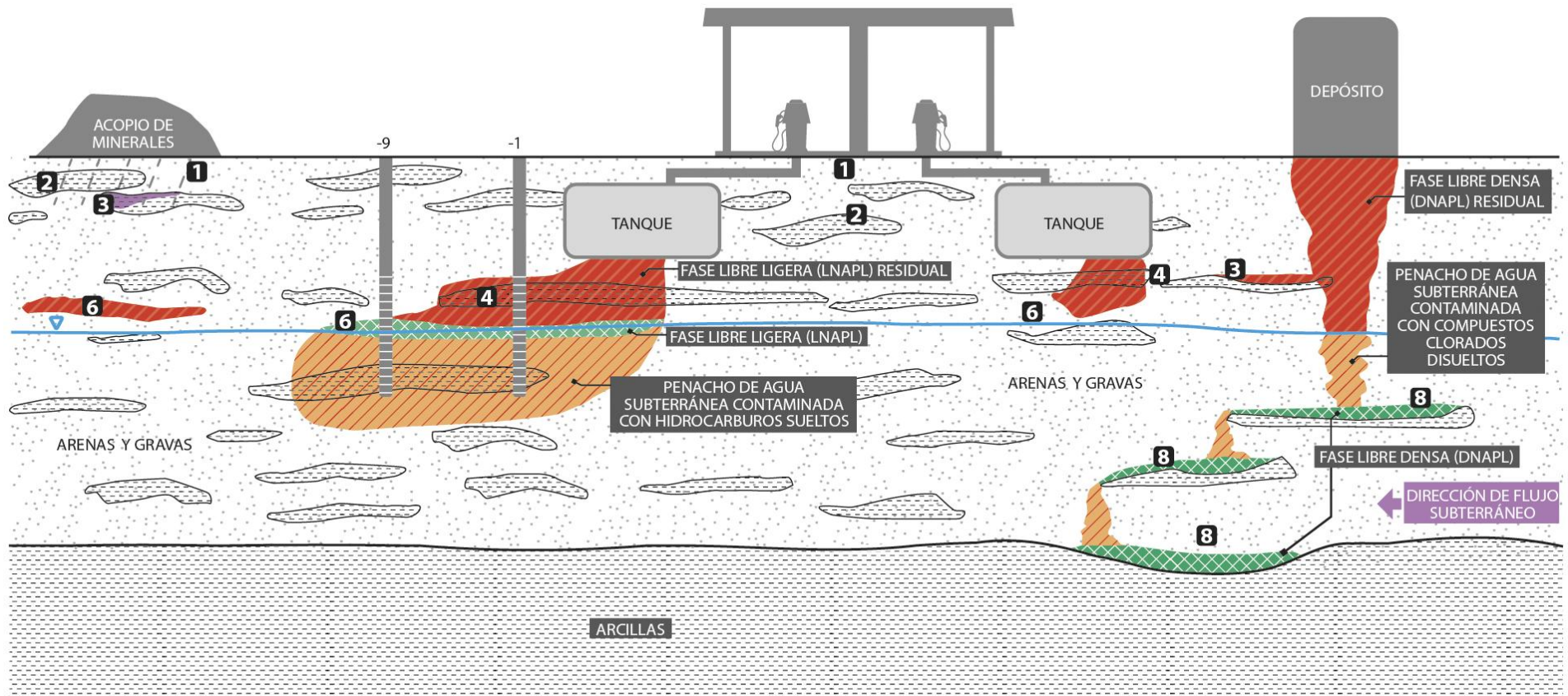


Por ejemplo, en un determinado PDM la fuente de los posibles metales existentes puede ser exclusivamente superficial, en cuyo caso las muestras a tomar corresponderán normalmente a los niveles de rellenos antrópicos y los primeros horizontes naturales de permeabilidad limitada, no siendo por tanto de aplicación otros niveles intermedios de interés (p.ej. nivel en torno a depósito subterráneo de gasolina sin plomo).

De igual forma, si en ese mismo PDM se dispone de equipos de medida in situ apropiados y no se detectan niveles de afección diferentes del fondo ambiental a nivel superficial, el análisis de los compuestos orgánicos puede ceñirse a las localizaciones en profundidad en torno p.ej. a un depósito subterráneo.

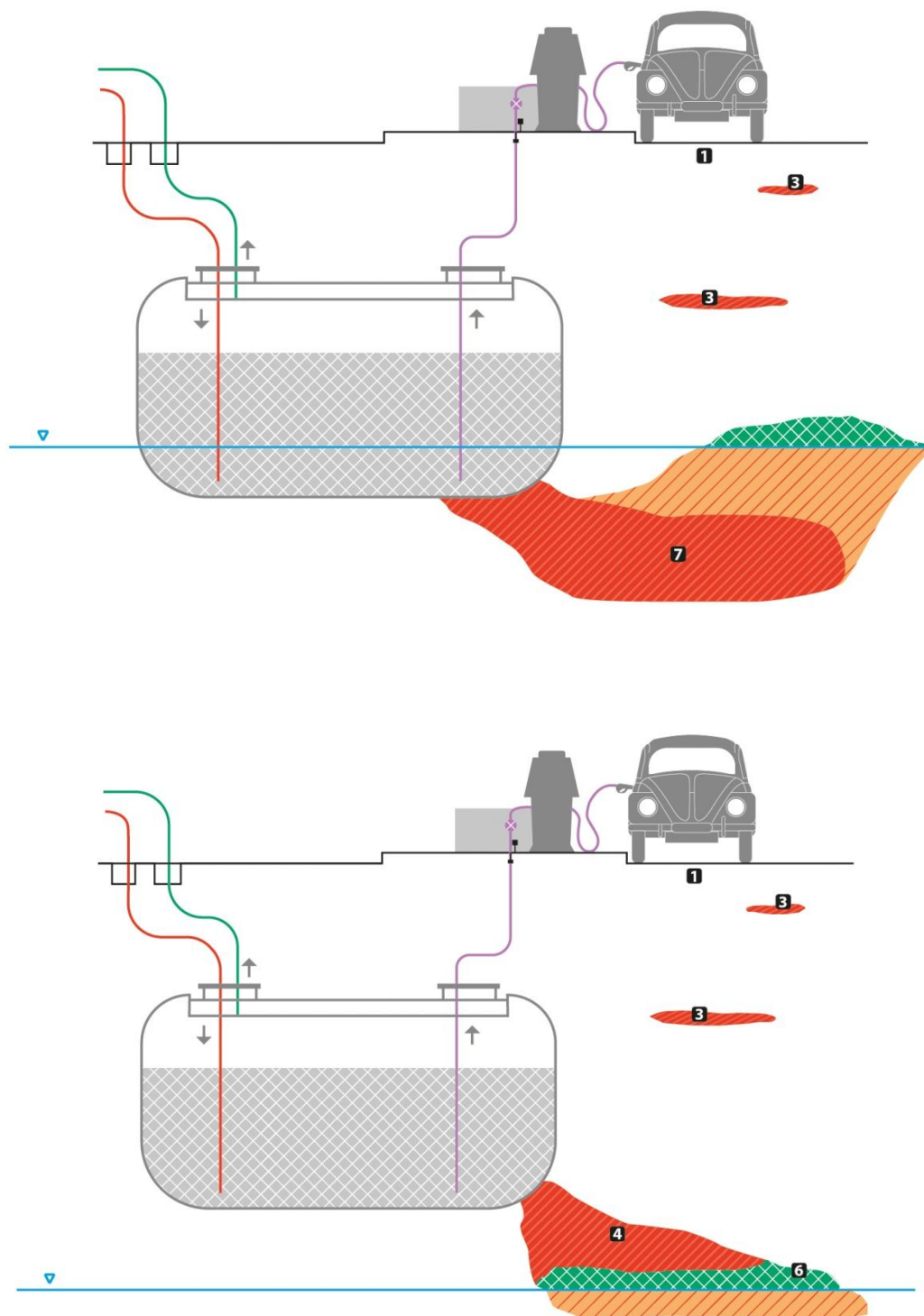


Figura 2: Croquis de diferentes profundidades de interés para el muestreo



Identificación de cada profundidad de interés de acuerdo a la codificación realizada en la anterior tabla 3

Figura 3: Profundidades de muestreo en torno a focos periódicamente sumergidos en zona saturada



4.3.3 Muestras simples y muestras compuestas

Se entiende por muestra simple o puntual aquella muestra de material recogida en un solo punto y a una profundidad dada, incluyendo dentro de este concepto la porción de testigo que sea necesario considerar para obtener un adecuado volumen de muestra (40 cm como mucho por lo general), y por muestra compuesta a aquella formada a partir de varias muestras puntuales, mezcladas en proporciones adecuadas, a partir de la cual se pretende obtener el valor medio de una variable característica.

En la evaluación de suelos contaminados interesa obtener valores de concentración media suficientemente representativos de las diferentes zonas estudiadas. Las muestras compuestas proporcionan en teoría mayor representatividad que las puntuales, pero son desaconsejables en el estudio de suelos por varios motivos:

- No es normalmente un medio homogéneo, por lo que existe un alto riesgo de provocar la no detección de una zona contaminada por dilución de muestras que presenten afección con otras sin ella.
- Al no ser un medio homogéneo y disponer por lo general un reducido número de PDMs en relación a la superficie a estudiar, las muestras compuestas reducirían la información disponible sobre la variabilidad espacial en la distribución de contaminantes.
- Su mezcla ha de realizarse a partir de alícuotas homogenizadas de igual masa, difíciles de obtener en campo sobre alícuotas de diferente granulometría y grado de humedad, por lo que la mezcla debería realizarse en laboratorio.
- Dicha homogenización no es compatible con la caracterización de compuestos volátiles.

Se limita por ello con carácter general el uso de muestras compuestas, aconsejando su sustitución por el análisis de muestras puntuales, que aportan mayor información espacial, y permiten asimismo el cálculo de valores medios estadísticos si se dispone de un número suficiente de datos. Para obtener más detalles sobre el cálculo de estos valores medios consultar el documento reconocido “Guía de evaluación de riesgos para salud humana en suelos potencialmente contaminados”.

Únicamente se podrían emplear muestras compuestas para poder descartar la existencia de contaminación de determinadas áreas de las instalaciones con bajo riesgo de afección.

Para investigar zonas con riesgo de afección de origen conocido y delimitar zonas contaminadas se hará siempre uso de muestras simples. Por ello, nunca se realizarán muestras compuestas cuando se detecte por ensayos in situ, a visu u organolépticamente, la presencia de contaminantes en concentraciones superiores a los niveles esperados del fondo en alguna de las submuestras a emplear en la composición.



Cada muestra compuesta se realizará a partir de un número máximo de n submuestras, siendo $n = \text{NGR/LC}$ (siendo LC el límite de cuantificación analítico), todas de igual masa, y tomadas a la misma o similar profundidad y sobre materiales de la misma naturaleza en varios puntos de muestreo contiguos. No está indicada la composición de submuestras tomadas a diferentes profundidades sucesivas en un solo punto de muestreo, a menos que todas las submuestras pertenezcan al mismo tipo de material litológico.

La composición de las muestras se realizará en laboratorio, no en campo, con objeto de que todas las submuestras participen con igual peso en la muestra compuesta. No se realizarán muestras compuestas cuando haya presencia de compuestos orgánicos volátiles, a menos que se realicen sobre los extractos siguiendo normas de referencia (UNE-ISO 14507). Para los compuestos semivolátiles la composición está permitida sobre submuestras sometidas previamente a molienda criogénica (UNE-ISO 14507).

Para dar validez a la información obtenida con una muestra compuesta, y por tanto descartar la necesidad de realizar nuevos muestreos puntuales en la zona o perfil representado por la muestra compuesta, los resultados analíticos obtenidos deben ser inferiores a un valor equivalente al $1/n$ (siendo n el número de submuestras empleadas en la muestra compuesta) del nivel normativo de comparación aplicado en la evaluación del estudio correspondiente (EPA 1995), de acuerdo con el apartado de “Evaluación de los resultados en estudios de caracterización”.

Las submuestras empleadas en la elaboración de muestras compuestas recibirán el mismo tratamiento durante todo el proceso de la investigación que una muestra individual, en cuanto a identificación única, georreferenciación con coordenadas UTM precisas, profundidad, etc., identificándose y describiéndose adecuadamente (con tablas de resultados y cartografía) en el correspondiente informe de caracterización.

4.3.4 Muestreo de aguas subterráneas

De existir en el emplazamiento aguas subterráneas susceptibles de afección por contaminación del suelo se procederá a incorporarlas al plan de muestreo.

El muestreo de las aguas subterráneas persigue un doble objetivo:

- Detectar una posible contaminación en el subsuelo que pueda pasar inadvertida a través del muestreo de la fase sólida por diferentes motivos (menor representatividad espacial, deficiente recuperación de volátiles, etc.)



- Caracterizar la concentración de contaminantes en uno de los puntos de exposición posibles con vistas a la realización del ACR.

Se realiza por tanto no sólo con objeto de caracterizar su calidad, sino como herramienta complementaria al muestreo de suelos en la localización de afección en la zona no saturada. Por ello, con independencia de que en el modelo conceptual se determinara la ausencia de una vía de exposición a través de las mismas, la caracterización exploratoria contemplará su estudio.

No existe una profundidad límite que permita discernir cuándo es descartable la afección de las aguas subterráneas por el efecto de filtrado y autodepurador de la zona no saturada. Esta profundidad variaría en función de múltiples factores, entre ellos la permeabilidad del terreno y la magnitud e importancia de las posibles fugas de contaminantes del emplazamiento en cuestión, por lo que no es asumible descartar el estudio de las aguas subterráneas a partir de una profundidad fija general para todo tipo de emplazamientos.

En cada caso se deberá razonar de forma justificada si se descarta el muestreo de las aguas subterráneas en razón a la profundidad de las mismas, siendo especialmente conservador cuando existan depósitos de combustibles líquidos subterráneos o aéreos de gran tamaño.

Se estudiará la posible afección al nivel acuífero más vulnerable o susceptible de afección, que por lo general será el nivel más superficial, aunque dependiendo del caso y de la magnitud de la posible afección y de los receptores expuestos a cada nivel acuífero, puede ser necesario estudiar igualmente de forma segregada algún nivel acuífero inferior.

En esta etapa, se ubicarán un mínimo de 3 piezómetros para el control de las aguas subterráneas, de manera que también se pueda determinar aunque sea de manera grosera el sentido y gradiente del flujo subterráneo.

Se incrementará no obstante este número de PDMs en la manera que sea necesario para satisfacer los siguientes criterios:

- Se instalarán piezómetros en todos los PDMs ubicados junto a depósitos de combustibles líquidos (sobre el foco si ya fueron retirados y en caso contrario a <5m en la dirección del flujo), sean en superficie o subterráneos.

Si existen varios depósitos de moderado tamaño y próximos entre sí, se podría reducir el número inicial de piezómetros necesarios a la mitad, es decir, un piezómetro por cada dos depósitos, siempre y cuando el piezómetro se ubique aguas abajo (en la dirección de propagación de la



contaminación) de ambos depósitos, alineado con ellos en la dirección dominante del flujo subterráneo, la distancia entre el piezómetro y el punto más alejado del depósito más distal no supere una cierta distancia (aprox. 20 m), y la columna litológica del PDM de suelos que caracteriza dicho depósito no haya mostrado indicio alguno de posible afección.

- En el resto de focos de contaminación conocidos, se ubicarán en las localizaciones más críticas de la instalación, igualmente sobre el foco o a $<5\text{m}$ en el sentido del flujo subterráneo, prestando especial atención a la existencia de otros contaminantes líquidos, suelos que puedan lixiviar ciertas sustancias, etc.
- En zonas de contaminación difusa se ubicará al menos un piezómetro que, dentro del perímetro de la zona, se ubique en una posición aguas abajo de la misma. En zonas de contaminación difusa de entre 1 y 5 Ha serán 2 los piezómetros a instalar en ubicaciones igualmente aguas abajo (en la dirección de propagación de la contaminación) pero espaciados lateralmente, mientras que si son de más de 5 Ha se instalarán como piezómetros al menos la cuarta parte del total de puntos de muestreo destinados a suelos, conforme a la tabla indicada en apartados anteriores.
- En líneas generales se dispondrá al menos un piezómetro en alguna posición aguas arriba del emplazamiento que facilite la estimación de las curvas isopiezas, el cual podrá coincidir con alguno de los ya reseñados, salvo que se prevea la afección previa de las aguas que entran al emplazamiento a causa de otras actividades ubicadas en parcelas ubicadas aguas arriba, en cuyo caso dicho piezómetro será específico para el control de esta afección de partida.
- En caso de estudiar las aguas subterráneas asociadas a un vertedero de residuos, y de acuerdo con el RD 1481/2001 por que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertederos, se ubicará un piezómetro agua arriba y al menos dos piezómetros aguas abajo. Estos dos últimos se dispondrán en el perímetro del vertedero tan próximos al mismo como sea posible ($< 5\text{m}$ siempre que ello sea físicamente posible) y espaciados lateralmente entre sí, procurando cubrir entre ambos las direcciones de flujo subterráneo más probables, y permitiendo de esta forma una detección eficaz de posibles fugas en la base del vertedero.

Se podrán emplear para este fin piezómetros ya instalados en el vertedero si su ubicación cumple estos requisitos, y sus características constructivas son compatibles o equiparables con las estipuladas en posteriores apartados de este documento.

Estos piezómetros van asociados al estudio de la posible afección a partir del vaso del vertedero, y serían independientes de los que este tipo de instalaciones pueda necesitar adicionalmente, para controlar otros posibles focos de afección (p.ej. balsas de lixiviados, etc.).

4.4 DISEÑO DE LA CARACTERIZACIÓN DE DETALLE

Los trabajos de caracterización de detalle se realizarán normalmente sobre emplazamientos en los que se



haya llevado a cabo previamente un estudio de caracterización y de análisis de riesgos exploratorios, cuyos resultados pueden ser los siguientes:

- a) Se superan los riesgos admisibles sin que la incertidumbre del análisis haga variar esta conclusión.
- b) Se superan los riesgos admisibles, existiendo no obstante un elevado grado de incertidumbre en la evaluación, que impide garantizar que las conclusiones no sean distintas ante algunas variaciones en el análisis.
- c) No se superan los riesgos admisibles, existiendo no obstante un elevado grado de incertidumbre en la evaluación, que impide garantizar que no existan riesgos ante algunas variaciones en el análisis.
- d) Se puede asegurar que no existen riesgos superiores a los admisibles, sin que la incertidumbre del análisis haga variar esta conclusión.

En un escenario industrial, será preciso llevar a cabo la investigación detallada en el caso c), aunque puede ser recomendable igualmente acometerla en el supuesto a) y fundamentalmente en el b) con objeto de afinar el análisis realizado y en su caso el volumen de suelos contaminados y los valores objetivo de la correspondiente remediación.

Si en el emplazamiento se va a llevar a cabo un cambio de uso industrial a uso urbano, con la consiguiente reparcelación del terreno, el estudio de detalle es obligado en los casos a) b) y c).

En cualquiera de los casos el objetivo de la investigación y el consiguiente ACR detallados, es la reducción de fuentes de incertidumbre y el ajuste tanto de los riesgos calculados como de los niveles objetivo establecidos para la posterior remediación, con medidas como:

- Delimitación de la extensión de la afección.
- Determinación de las concentraciones características con valores de tendencia central, si ello no ha sido posible por insuficiencia de datos en la etapa exploratoria.
- Caracterización directa de los contaminantes en algunos medios de exposición, evitando la modelización.
- Especiación química de algún contaminante.
- Etc.

4.4.1 Selección de los puntos de muestreo



En lo que respecta a la delimitación de la extensión de la afección y el afinamiento de las concentraciones características, para la elaboración del plan de muestreo detallado de suelos se deberán diferenciar en el emplazamiento las zonas de afección de focos conocidos de los difusos, conforme a la descripción y clasificación de las mismas realizada en apartados anteriores.

4.4.1.1 Zonas con riesgo de contaminación de origen conocido

En torno a cada uno de los puntos de muestreo que en fase exploratoria hayan superado niveles normativos, se dispondrán cuatro puntos de muestreo adicionales, en diferentes direcciones del espacio, que permitan delimitar la extensión de la contaminación.

4.4.1.2 Zonas con posibilidad de contaminación de origen difuso o no conocido

Se dispondrá una malla de muestreo que completará la ya existente en la fase exploratoria, y que se asemejará a una red de muestreo sistemática o regular, de tipo cuadrada o triangular, con un espaciado entre puntos próximos más o menos constante.

La densidad de la malla de muestreo diseñada deberá ser técnicamente justificada, pudiendo adoptar como densidad mínima, en conjunto con la red exploratoria ya existente, la resultante de la siguiente regla:

Tabla 4: Densidad de muestreo detallado en zonas de afección difusa

Superficie (Ha)	Nº puntos muestrales	Superficie (Ha)	Nº puntos muestrales
? 0,03	3	7,5	49
0,06	6	10	58
0,1	9	15	75
0,25	9	20	100
0,5	12	25	125
0,75	12	30	150
1	15	35	175
2	18	40	200
3	25	45	225
4	31	50	250
5	36	60	300

Para superficies intermedias a las reflejadas en la siguiente tabla, se tomará un número de puntos proporcional, por interpolación lineal, entre los correspondientes a una superficie menor y mayor a la dada.

Alternativamente, se podrán proponer otras densidades de muestreo para estas zonas, que estén debidamente justificadas y extraídas de normas técnicas de reconocido prestigio en la investigación de

suelos (como normas UNE, ISO, EPA, ASTM), que se adoptarían en su caso igualmente como documentos reconocidos.

4.4.1.3 Delimitación de la extensión en superficie de la contaminación

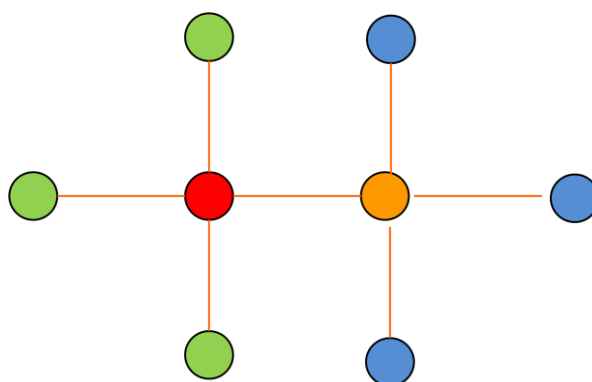
En cualquiera de los supuestos establecidos, la distribución resultante de los puntos de muestreo deberá ser tal que delimite en superficie la extensión de la posible afección de los suelos.

Para ello, la masa o nube de puntos en los que haya sido detectada la afección, deberá estar rodeada con valores inferiores a los niveles normativos de comparación empleados, de acuerdo con el apartado de “Evaluación de los resultados en estudios de caracterización”.

Tal como se recoge en el documento “Guía para la evaluación de riesgos para salud humana en suelos potencialmente contaminados”, existen algunas razones por las cuales los valores objetivo de remediación de un análisis cuantitativo de riesgos (Tier 2) pudieran ser inferiores a los niveles normativos de screening o NGRs (Tier 1) que motivan su realización. Si tal fuera el caso en un emplazamiento dado, se tendrán en cuenta igualmente esos valores objetivo para la delimitación de la afección en la investigación detallada.

Si los puntos de afección se detectan en zonas con riesgo de contaminación de origen conocido, se ubicarán puntos adicionales de muestreo en aquellas direcciones en torno a los focos detectados en las que se continúe detectando afección.

Figura 4: Delimitación de la afección en torno a focos localizados



-  Punto de muestreo exploratorio con afección superior a niveles normativos
-  Puntos de muestreo detallado iniciales libres de afección
-  Puntos de muestreo detallado iniciales con afección superior a niveles normativos



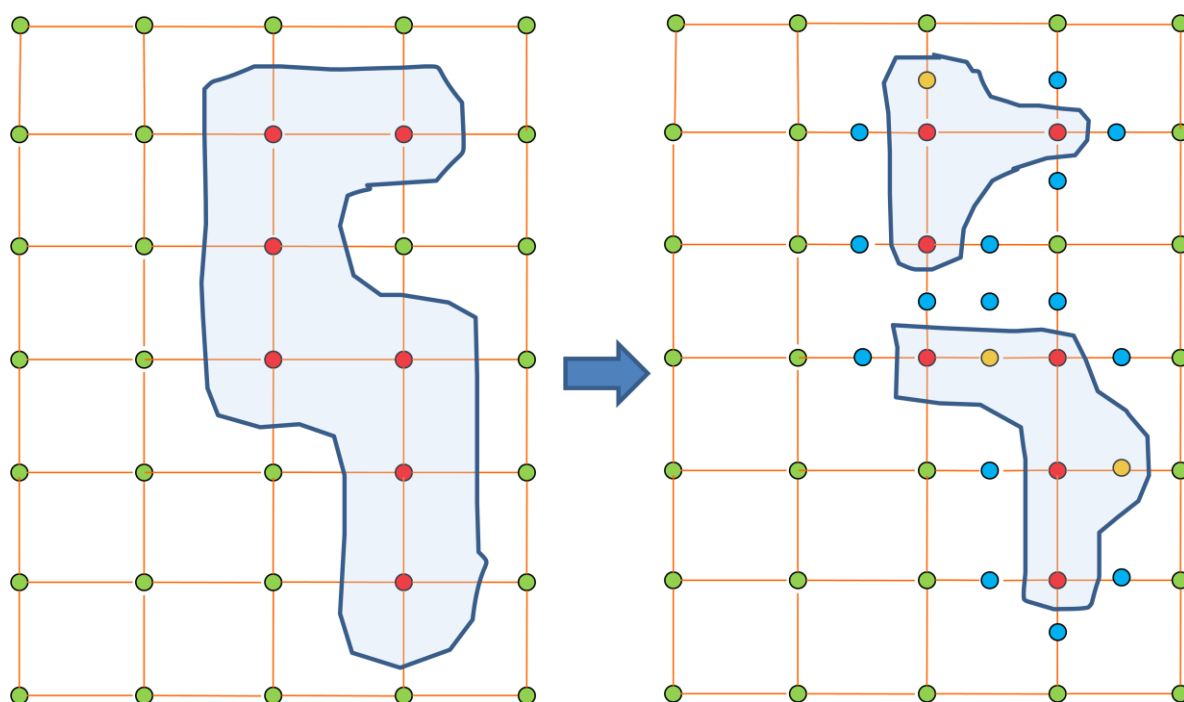


Puntos de muestreo detallado en segunda ronda libres de afección

En zonas con riesgo de contaminación de origen difuso o no conocido, se encontrarán puntos con afección y otros puntos libre de ella. Los puntos con afección contiguos configurarán zonas de afección, cuyos límites es posible afinar, especialmente cuando exista un proyecto de segregación del emplazamiento en parcelas de pequeño tamaño.

Para ello, en torno a los puntos de afección perimetrales de la mancha o zona de afección, se podrán disponer nuevos puntos de muestreo en las direcciones correspondientes de la malla de muestreo en la que se observen puntos limpios de afección, a una distancia más o menos intermedia entre ambos puntos.

Figura 5: Delimitación de la afección en torno a zonas de afección difusas



Con carácter general, en caso de parcelación del terreno con un cambio de uso industrial a uso urbano, cada parcela catastral o registral resultante que se solape con áreas en las que se hayan identificado riesgos en el ACR exploratorio, deberá contar al menos con un punto de muestreo, con independencia de que se trate de un emplazamiento con contaminación difusa o localizada. El número de puntos de muestreo deberá aumentarse según el tamaño de la parcela, considerándose puntos de muestreo según mallados de 15x15 m, o incluso de 10x10 m, tal y como se indica en la Norma UNE-ISO 10381-5:2010



“Calidad del suelo. Muestreo. Parte 5: Líneas directrices para el estudio de suelos contaminados en emplazamientos industriales y urbanos”.

4.4.2 Selección de las profundidades de muestreo

Se seguirán los mismos criterios expuestos para investigaciones exploratorias.

En zonas con posibilidad de contaminación de origen difuso o no conocido podrán obviarse las muestras correspondientes a un determinado horizonte, por ejemplo de materiales de relleno recientes, etc., si los resultados analíticos de una etapa anterior de la investigación no presentan afección en ninguno de los casos y la malla de puntos de esa primera fase cubre toda la zona a estudiar.

4.4.3 Muestras simples y muestras compuestas

En la caracterización de detalle no se podrán tomar muestras mixtas o compuestas; exceptuando de esta categoría la porción de testigo que sea necesario contemplar para obtener el volumen de muestra necesario, que no debe ser superior a 40 cm.

4.4.4 Plan de muestreo de aguas subterráneas

La malla diseñada para el muestreo de aguas subterráneas será lo suficientemente extensa como para, apoyándose en su caso en la red de muestreo habilitada en la etapa exploratoria, delimitar la extensión y profundidad de la contaminación.

En el estudio de la afección a las aguas subterráneas se tomará un punto de referencia aguas arriba de los posibles focos de contaminación del emplazamiento, y a partir de él, varios puntos aguas abajo en la dirección del flujo subterráneo, y también perpendicularmente, de manera que abarquen aproximadamente tanto la longitud como la anchura de la posible pluma contaminante.

Se tendrá en cuenta no obstante que en casos excepcionales puede ocurrir que la pluma contaminante no tenga por qué extenderse de forma totalmente solidaria a favor de la dirección del flujo subterráneo, en cuyo caso se plantearán las ubicaciones de muestreo adicionales y alternativas necesarias para delimitar la afección. Así puede ocurrir con las fases libres en presencia de determinadas estructuras geológicas en el subsuelo (p.ej. estratificación oblicua a la dirección del flujo).

Los puntos de muestreo tratarán de seguir una disposición radial que parta del punto de referencia, aunque adaptando la disposición de los diferentes puntos de forma que se cubran las principales zonas de almacenamiento de materias, productos y residuos, y las principales zonas de procesos.



En cualquier caso, se dispondrán puntos de muestreo en el límite de la parcela en estudio con otras parcelas colindantes, en el sentido del flujo subterráneo. De detectarse contaminación en algunos de estos puntos respecto a las aguas del punto de referencia, y respecto a los criterios normativos expuestos en el apartado “Evaluación de la conformidad sobre la calidad de las aguas subterráneas”, será necesario prolongar la malla de muestreo en idénticos términos a lo anteriormente expuesto a la superficie de las parcelas colindantes afectadas, para lo cual deberán obtenerse los permisos o autorizaciones necesarios.

De existir pozos de captación de aguas subterráneas en el entorno del emplazamiento que pudieran verse afectados por la contaminación del suelo, serán incorporados al plan de muestreo.

4.4.5 Plan de muestreo de aguas superficiales

Las aguas superficiales próximas a un emplazamiento con suelos potencialmente contaminados pueden verse afectadas por las escorrentías superficiales y de manera más permanente por la descarga de aguas subterráneas afectadas.

El muestreo de estas aguas superficiales, pertenecientes al dominio público hidráulico o al marítimo-terrestre, no es obligatorio en una caracterización de detalle, pero se podrá contemplar en aquellos casos en que el ACR exploratorio determine la existencia de riesgos superiores a los permitidos para los usuarios de estas aguas (zonas de baño, cotos de pesca, etc.), o en ausencia de receptores concretos, las concentraciones modelizadas en las mismas superen los criterios normativos de calidad ambiental evidenciando su posible deterioro.

Para su caracterización se ubicarán al menos dos PDMs, ubicado el primero de ellos aguas arriba de la zona estimada de intercepción de la posible pluma de aguas subterráneas contaminantes, y el segundo de ellos aguas abajo de dicha zona y de la zona estimada de mezcla de la descarga subterránea con las aguas del cauce superficial, ya que las normas de calidad ambiental son aplicables una vez superada dicha zona (art. 26 del Real Decreto 817/2015).

Esta zona de mezcla es de dimensiones muy variables, dependiendo del tamaño y el calado del curso superficial y de la pluma subterránea contaminante, de la geometría del curso superficial, de la rugosidad o heterogeneidad del fondo del cauce, etc.

Para la estimación de esta zona de mezcla se pueden emplear medidas in situ (p.ej. pH y conductividad eléctrica) tomadas en diferentes puntos de la longitud, sección y profundidad del tramo de curso



superficial afectado, o bien puede estimarse mediante algoritmo matemático (p.ej. Anexo A ISO 5667-6:2014) si la geometría del cauce fuera más o menos constante.

En su defecto puede tomarse una medida orientativa de 100 m aguas abajo desde el punto central de la zona estimada de intercepción, ya que en esta distancia se estima que en la mayoría de las ocasiones se produce la mezcla en la vertical de un vertido. La mezcla lateral y longitudinal pueden producirse tras longitudes algo mayores, especialmente en cursos con escasa velocidad de corriente, anchura considerable, geometría lineal constante, etc.

La zona de mezcla no obstante, deben tener una extensión limitada a las proximidades de los puntos de vertido, no pudiendo dimensionarse en demasía, lo que permitiría la degradación, precipitación, etc. injustificada de algunos de los contaminantes a determinar antes de su muestreo, y por tanto a una subestimación de la afección producida en el medio receptor. En caso de duda pueden adoptarse más de un PDM aguas abajo, en diferentes longitudes y puntos de la sección del río.

Además, en la afección de las aguas superficiales a partir de una pluma contaminante en las aguas subterráneas no se parte de un vertido en superficie concentrado, sino que la afección ya de por sí se encuentra diluida y difusa en cierta medida en un determinado ámbito espacial, por lo que la mezcla con el curso superficial debe producirse antes que en el caso de un vertido.

La elección del punto o puntos concretos de muestreo aguas abajo debe ser en todo caso justificada técnicamente en el plan de muestreo y el informe de resultados.

En el punto seleccionado la muestra debe ser tomada normalmente en algún punto central del cauce si se estima que se ha producido la mezcla, o bien de manera conservadora de la mitad del cauce hacia la orilla donde se produce la descarga subterránea. Si el curso superficial sigue trayectorias curvas se tomaría de la mitad del cauce limítrofe con la orilla cóncava, que es la zona por donde discurre la mayor parte del flujo y por tanto más representativa.

Si en algún tramo del cauce receptor se haya delimitada cualquier zona de uso del río (zona de baño, coto de pesca, etc.) para el cual se hayan identificado riesgos, se ubicará un PDM adicional ligeramente (algunos metros) aguas abajo del punto central de la zona de intercepción de la descarga subterránea, ya que en ese caso, la calidad del medio receptor debe asegurarse en toda la extensión del tramo.

En este caso la muestra será tomada en las proximidades de la orilla por donde se produce la descarga subterránea.



Si no se están estudiando compuestos inmiscibles con el agua, la muestra se debe tomar sumergiendo los recipientes de muestreo (botellas o recipientes intermedios) a una profundidad mínima de unos 30 cm de la superficie, y en todo caso 30 cm por encima del fondo.

En caso de que alguno de los compuestos estudiados sea inmisible (p.ej. hidrocarburos) la muestra se tomará a ras de la superficie del agua, dejando la boca del recipiente de muestreo parcialmente sumergida en el agua. Para controlar en este caso la profundidad del muestreo, lo ideal es emplear útiles de muestreo acoplados a mangos telescópicos.

Si la profundidad de muestreo no es determinante, pueden emplearse recipientes con cuerdas, cadenas de acero inoxidable, etc..

Si la muestra es tomada desde un puente, lo ideal es tomarla por el margen que queda aguas arriba del cauce porque se reducen las consecuencias ocasionadas por las turbulencias. Al igual ocurre si el muestreo se realiza a pie vadeando el fondo del río, por ejemplo en ríos con menos de 50 cm de calado; la muestra debe tomarse disponiéndose el operador con la vista aguas arriba del cauce.

Evitar en el muestreo lugares de características específicas apartadas del grueso del curso superficial del agua, p.ej. lugares excesivamente pegados a la orilla, áreas estancadas, pozas más profundas, remolinos, etc.

Se pueden emplear muestreadores automáticos siempre y cuando ello no vaya en detrimento de adoptar las mejores ubicaciones de muestreo y de preservar las muestras en las condiciones de aireación y temperatura acordes con la naturaleza de los compuestos que se van a analizar. La velocidad de aspiración de estos equipos debe ser semejante a la del flujo del cauce superficial.

En lo que respecta a la extensión temporal del muestreo para que el mismo sea suficientemente representativo, se deberán llevar a cabo muestreos en diferentes momentos del año de manera que cubran las mayores variaciones ambientales que cabe prever en el emplazamiento. De acuerdo a la norma ISO 5667-6:2014, al menos se deben contemplar muestreos en épocas de estiaje y de lluvias, y en ubicaciones sometidas a influencia mareal, en momentos de marea alta y marea baja.

4.4.6 Plan de muestreo del aire ambiente

El muestreo del aire ambiente no es obligatorio en una caracterización de detalle, pero se podrá



contemplar en aquellos casos en que el ACR exploratorio determine la existencia de riesgos superiores a los permitidos por inhalación de partículas y/o vapores en espacios abiertos.

Si los riesgos que se pretenden reevaluar fueran “on site”, los PDMs a contemplar se ubicarían sobre el suelo contaminado, ligeramente a sotavento (pocos metros “aire abajo”) respecto a aquellas zonas en las que se hayan detectado las máximas concentraciones del elemento o elementos que inducen los riesgos, en la dirección de los vientos predominantes.

Si los riesgos inicialmente obtenidos fueran “off site”, se ubicarán PDMs ligeramente a barlovento (pocos metros “aire arriba”) respecto a las diferentes ubicaciones (urbanizaciones residenciales, chalets aislados, etc.) donde existan receptores actuales para los que se hayan identificado riesgos superiores a los permitidos, en la dirección en la que se encuentra el suelo contaminado. Si fueran receptores futuros correspondientes a diferentes ubicaciones, se podrá disponer un único PDM, ligeramente a barlovento (pocos metros “aire arriba”) respecto a la ubicación del futuro receptor para el que se hayan identificado los mayores niveles de riesgo, en la dirección en la que se encuentra el suelo contaminado.

La frecuencia del muestreo con objeto de garantizar su representatividad temporal, seguirá las indicaciones del Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire (o normativa que lo sustituya), debiendo disponerse de datos válidos que cubran un 14% del período anual. Este período temporal debe ser igualmente representativo de las diferentes condiciones climáticas anuales, pudiendo corresponderse con medidas diarias efectuadas en cada semana del año, o bien medidas semanales durante 8 semanas distribuidas uniformemente a lo largo del año.

La equipos de muestreo y/o análisis se dispondrán evitando restricciones u obstáculos al flujo del aire, normalmente varios metros alejados de edificios, árboles, etc. La entrada del aire al equipo se dispondrá a una altura que sea representativa de la franja de aire respirable para el receptor sobre el que se han identificado los riesgos en el ACR exploratorio. Normalmente, dicha altura se colocará a 1,5 m, considerándose representativa de la franja de 0-2 m habitualmente empleada por defecto en los análisis de riesgo para un receptor ubicado sobre el nivel del suelo.

El muestreo se llevará a cabo sobre las partículas y/o los vapores, de acuerdo a la/s forma/s del contaminante que genere/n riesgos superiores a los permitidos, o en su defecto (riesgos acumulativos) que contribuyan en mayor medida a los riesgos determinados.

La toma de muestras seguirá siempre que existan y sea factible métodos normalizados, preferentemente métodos UNE indicados en la normativa de calidad del aire, métodos EPA o en su defecto métodos



correspondientes al campo de la salud laboral (métodos NIOSH, etc.).

4.4.7 Plan de muestreo de la fase gaseosa del suelo y la intrusión de vapores

El muestreo de la fase gaseosa del suelo y del aire en el interior de edificios no es obligatorio en una caracterización de detalle, pero se podrá contemplar en aquellos casos en que el ACR exploratorio determine la existencia de riesgos superiores a los permitidos por inhalación de vapores en espacios abiertos o cerrados.

También puede ser una medida de muestreo a contemplar, incluso sin la existencia aparente de esos riesgos, en situaciones en las que el muestreo de los suelos no se considere suficientemente representativo de la afección por compuestos volátiles posiblemente existente en la zona no saturada de un emplazamiento.

Así puede ocurrir por ejemplo cuando la caracterización de suelos no arroje resultados significativos sobre la presencia de compuestos orgánicos volátiles, pero se tenga constancia de la existencia de vapores contaminantes en la zona no saturada (p.ej. por medidas de PID), o las aguas subterráneas, si existen, reflejen importantes concentraciones de estos compuestos aún cuando no presenten riesgos por diferentes motivos (profundidad p.ej.).

Según algunas fuentes consultadas (ISO 15800:2003 e ISO 15175:2004), citando experiencias prácticas realizadas, la eficiencia en la recuperación de volátiles mediante el muestreo de suelos es limitada, aún en el mejor de los casos posible. El documento EPA OSWER 9200.2-154 considera el muestreo de suelos orientativo en la evaluación de la intrusión de vapores en caso de registrarse resultados positivos, no siendo así en caso de obtenerse resultados negativos (valores inferiores a los límites de cuantificación). Por ello en estos casos, junto con el muestreo de aguas subterráneas, el muestreo de la fase gaseosa resulta muy recomendable.

No obstante el muestreo de la fase gaseosa también presenta sus inconvenientes, estando muy influenciado por las variantes condiciones ambientales y por las concentraciones del suelo en el entorno inmediato del PDM y no tanto del conjunto de la zona contaminada, especialmente en suelos cohesivos, no siendo por tanto medidas sustitutivas del muestreo de suelos.

Existen a este respecto varios tipos de muestreo posibles:



- **Muestreo exterior:** consiste en el muestreo de la fase gaseosa del suelo en PDMs independientes de la ubicación de edificios (a $>3\text{m}$ de distancia). Se emplea fundamentalmente para delimitar áreas contaminadas y para afinar o ajustar la evaluación de riesgos por inhalación de vapores en espacios cerrados en futuros escenarios donde aún no están presentes las correspondientes edificaciones. También puede ser empleado para afinar la evaluación de riesgos por inhalación en espacios abiertos si no se va a realizar un muestreo del aire ambiente.
- **Muestreo junto a cimentación:** consiste en el muestreo de la fase gaseosa del suelo en PDMs ubicados en el perímetro de una edificación. Es un muestreo sustitutivo del muestreo bajo cimentación, cuando este último no es posible o es difícil llevarlo a cabo. Presenta una serie de inconvenientes que lo pueden hacer menos representativo de las condiciones del subsuelo bajo los edificios, por lo que en general se prefiere el muestreo bajo cimentación. Algunos de estos inconvenientes serían los siguientes:
 - Quedarían fundamentalmente al margen de la célula de convección del aire que suele generarse bajo el subsuelo de los edificios, originada por la depresión normalmente existente en el interior de los mismos, que tiende a crear un flujo de aire hacia su interior.
 - Si no existe pavimento rodeando el edificio (p.ej. existencia de jardines), el grado de humedad del suelo sería mayor que bajo el mismo, presentando una menor permeabilidad al flujo de vapores.
 - La litología puede ser diferente a la de los materiales de relleno normalmente empleados bajo la cimentación, generalmente más permeables.
- **Muestreo bajo cimentación:** consiste en el muestreo de la fase gaseosa del suelo bajo la cimentación de los edificios, justo antes de la intrusión de los mismos en el interior de la edificación. Es el muestreo recomendado para evaluar los riesgos por intrusión de vapores.
- **Muestreo del aire interior** de los edificios: consiste en el muestreo del aire acumulado en el interior de los edificios, con objeto de valorar la importancia real de la intrusión de vapores del subsuelo contaminado. Se emplea cuando el muestreo bajo cimentación no es concluyente en la ausencia de riesgos y se desea realizar un mayor ajuste de la evaluación, realizándose una valoración conjunta de los resultados de ambos muestreos, o bien cuando por diversas circunstancias el muestreo bajo cimentación no puede ser llevado a cabo, no es suficientemente representativo o existe suficiente información previa de que precisa ser complementado, como por ejemplo:
 - Existencia de infraestructuras subterráneas (p.ej. saneamientos) que actúan como vías



preferentes de migración de los vapores contaminantes hacia el interior de los edificios, evitando su paso por la zona no saturada bajo la cimentación donde no pueden ser detectados.

- Nivel freático muy somero ($a < 0,6$ m de la base de la cimentación), que dificulta o imposibilita el muestreo bajo cimentación por la humedad.
- Zona no saturada afectada en contacto con la base de la cimentación.
- Contaminación en roca fisurada próxima a los bajos del edificio, donde no es posible la aplicación de los modelos de migración en zona no saturada (Johnson & Ettinger).
- Constancia de olores en el interior de los edificios o de efectos fisiológicos (diarreas, náuseas, vómitos) en sus habitantes.

Debido a la posible existencia de otras fuentes de contaminantes en el entorno del emplazamiento que pueden influir en la composición del aire del interior de las edificaciones, este muestreo precisa de una valoración de la contaminación de fondo en el exterior de la edificación (blanco ambiental).

Cuando se emplea en conjunción con el muestreo bajo cimentación, sus resultados se evalúan de manera conjunta.

A continuación se citan algunas recomendaciones que deben ser seguidas en el plan de muestreo de este tipo de investigaciones, tanto con carácter general para varias de ellas como a nivel particular de cada una.

4.4.7.1 Consideraciones de muestreo generales

Salvo el muestreo en el interior de edificios, el resto de investigaciones se lleva a cabo mediante la instalación de sondas temporales de vapor o pozos permanentes muy parecidos o casi idénticos a los piezómetros empleados en el muestreo de aguas subterráneas. En apartados posteriores de este documentos se aportan instrucciones más precisas sobre su construcción.

En casos excepcionales, como p.ej. en muestreos exteriores donde la afección se encuentre muy superficial, o como sustitutivo del muestreo bajo cimentación en sótanos de edificios sin pavimentar, se pueden emplear cámaras de flujo enclavadas sobre el terreno, determinando en este caso la tasa de emisión del contaminante por unidad de superficie y tiempo.



Los muestreos deben ser representativos de las diferentes condiciones ambientales existentes en el emplazamiento, de forma que se pueda caracterizar la variabilidad temporal de las concentraciones de contaminantes, y se asegure que las decisiones de gestión del riesgo que se adopten como consecuencia de la evaluación de estos muestreos, se realizan tomando en consideración las condiciones de emisión de vapores más desfavorables.

En condiciones invernales la presión del aire en el interior de los edificios suele ser menor y el flujo hacia el interior de los mismos mayor (efecto chimenea), y es previsible una mayor elevación del nivel freático susceptible de producir una mayor intrusión de vapores si éstos proceden fundamentalmente de las aguas subterráneas.

Sin embargo las temperaturas del aire del suelo y las condiciones de humedad son más favorables a la migración de vapores en época estival. El descenso del nivel freático que puede producirse podría exponer igualmente a la fase gaseosa del suelo algunos horizontes de terreno contaminado que en época de lluvias pueden quedar sumergidos, incrementando por tanto los vapores procedentes de la zona no saturada.

Por otro lado, las condiciones de renovación de aire en los edificios pueden variar a lo largo del año, dependiendo p.ej. del grado de funcionamiento de los sistemas de ventilación/climatización, la posibilidad o probabilidad de apertura de ventanas, etc., influyendo en los flujos de vapores existentes bajo los mismos.

Por todo ello, tal como aconsejan las fuentes consultadas, deben realizarse diferentes rondas de muestreo repartidas a lo largo del año, especialmente en invierno y en verano, y en aquellas otras situaciones ambientales y antrópicas que quepa diferenciar como significativas.

4.4.7.2 Muestreo exterior

Si el objetivo del muestreo es la evaluación de los riesgos por inhalación en futuras edificaciones, los PDMs se ubicarán en aquellas zonas que vayan a edificarse si se conocen. En su defecto, o si el objetivo del muestreo es el afinamiento de la evaluación de riesgos por inhalación en espacios abiertos, los PDMs se situarán sobre las áreas de mayor concentración de contaminantes en la zona no saturada y las aguas subterráneas afectadas.

Si el muestreo se realiza para delimitar el área de afección del subsuelo por contaminantes volátiles, se



debe disponer una malla de muestreo al tresbolillo en torno a la fuente previsible de la afección. La norma ISO 10381-7:2005 indica mallas de muestreo de 30-50 m en terrenos permeables y de 5-20 m en terrenos poco permeables para la monitorización de gases de vertederos. Otras fuentes establecen mallas similares de 5-20 m para la delimitación de áreas afectadas de pequeño tamaño.

La zona de captación de la fase gaseosa del suelo de las sondas de vapor/pozos debe colocarse a un nivel de profundidad justo a la altura de la zona no saturada del suelo que presente mayor afección y/o a 30 cm sobre la franja capilar del nivel freático si los vapores están originados por la presencia de un penacho de aguas subterráneas contaminadas. Si no se conoce con exactitud la posición de la franja capilar, se recomienda guardar una distancia total de 1 m respecto del nivel piezométrico.

A igualdad de otros factores, interesará normalmente tomar las muestras de aquellos niveles litológicos que presente mayor permeabilidad y menor grado de humedad, ya que van a ser los materiales más propicios para la migración de vapores.

A menos que los niveles de suelo afectados se sitúen a escasa profundidad, la zona de captación debe situarse a una profundidad superior a 1,5 m bajo la superficie del suelo, para evitar la dilución de la fase gaseosa del suelo con el aire ambiente.

En zonas pavimentadas (p.ej. aparcamientos) también es posible ubicar la zona de captación de muestra en los primeros centímetros bajo la pavimentación, en previsión de que sea un lugar de acumulación de los vapores y más próximos a los futuros receptores, con lo cual contemplaría por ejemplo la biodegradación que pueda producirse durante el ascenso de los vapores por la zona no saturada. Esta opción queda limitada no obstante a emplazamientos con pavimentación de gran extensión y altamente impermeable, donde no se pueda producir una dilución de los contaminantes por el aire ambiente (el asfalto p.ej. es bastante poroso).

4.4.7.3 Muestreo junto a cimentación

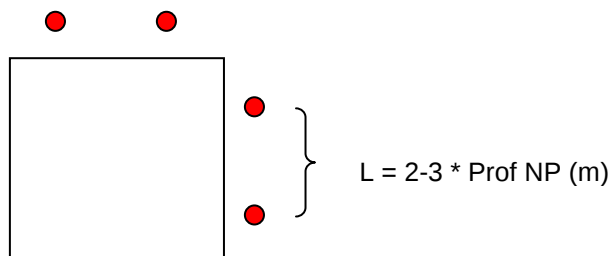
Los PDMs deben ubicarse lo más próximos posibles a los edificios que se pretenden caracterizar, junto a dos de los lados del mismo, aquellos que se encuentren más próximos a las zonas del subsuelo más contaminadas si existen heterogeneidades en el mismo. Si se pretende caracterizar la biodegradación de compuestos hidrocarburos, EPA recomienda el muestreo en todos los laterales del edificio.

En cada uno de los lados del edificio se dispondrá al menos un PDM en un punto central del mismo. En presencia de aguas subterráneas se aumentará el número de PDMs, disponiéndolos proporcionalmente



espaciados, de tal forma que la distancia entre puntos consecutivos sea similar a 2-3 veces la profundidad del nivel freático.

Figura 6: Ubicación de PDMs en el muestreo de vapores del suelo junto a cimentación



Si una vez conocidos los resultados, las concentraciones de contaminantes entre puntos consecutivos difieren en 2 o 3 órdenes de magnitud, se debe acometer algún PDM adicional entre ambos.

Si la zona contaminada del subsuelo no se solapa con la planta del edificio, la zona de captación de la fase gaseosa del suelo de las sondas de vapor/pozos debe colocarse a un nivel de profundidad bajo el nivel de la cimentación del edificio, y no a menos de 1,5 m de profundidad desde la superficie.

En caso de que la planta del edificio se solape con el área del subsuelo contaminado, la zona de captación debería instalarse junto o encima de la afección (siguiendo el mismo criterio que en el muestreo exterior) para estimar las peores condiciones posibles bajo la cimentación.

En caso de que el muestreo vaya dirigido a la caracterización de la biodegradación de compuestos hidrocarburos, se recomienda como se indica en posterior apartado, el muestreo tanto a nivel profundo junto a la fuente como a nivel somero al nivel inferior de la cimentación.

4.4.7.4 Muestreo bajo cimentación

El muestreo bajo cimentación es adecuado cuando las losas de cimentación del edificio cubren al menos el 50% del área ocupada por la planta del mismo. En áreas residenciales es conveniente combinarlo con el muestreo del aire interior de la vivienda.

Para una vivienda unifamiliar se recomiendan un mínimo de 2-3 PDMs, aumentándose el número mínimo de PDMs según la superficie de la cimentación a estudiar según la siguiente tabla:



Tabla 5: Densidad de muestreo de vapores del suelo bajo cimentación

Superficie de la cimentación	Uds.	Número mínimo de PDMs bajo cimentación
< 150	m2	2
150 - 500	m2	3
500 - 1000	m2	4
1000 - 2000	m2	5
2000 - 5000	m2	6
0,5 - 2,5	Ha	8
2,5 - 10	Ha	10
> 10	Ha	> 12

En grandes superficies (p.ej. centro comercial), cada espacio individualizado dentro del mismo con diferente cimentación debe considerarse por separado para el establecimiento de los PDMs necesarios.

En urbanizaciones con múltiples edificaciones de similares características afectadas por la posible intrusión de vapores, se recomienda la instalación de un número de PDMs tal que se estudien al menos un 10% de los edificios (EPA OSWER 9200.2-154), cubriendo aquellas zonas del subsuelo más contaminadas.

Con independencia de estos criterios mínimos, se tendrá en cuenta la necesidad de disponer de PDMs específicos en determinados casos:

- Cuando existan diferentes tipos de cimentación
- En caso de compartimentación del edificio para diferentes usos (vivienda, oficinas, guarderías, etc.)
- Existencia de zonas del edificio con diferentes sistemas de ventilación/climatización.

Se evitará el muestreo bajo cimentación en áreas con grietas o daños en dicha cimentación, que puedan ser agravadas por la perforación a realizar.

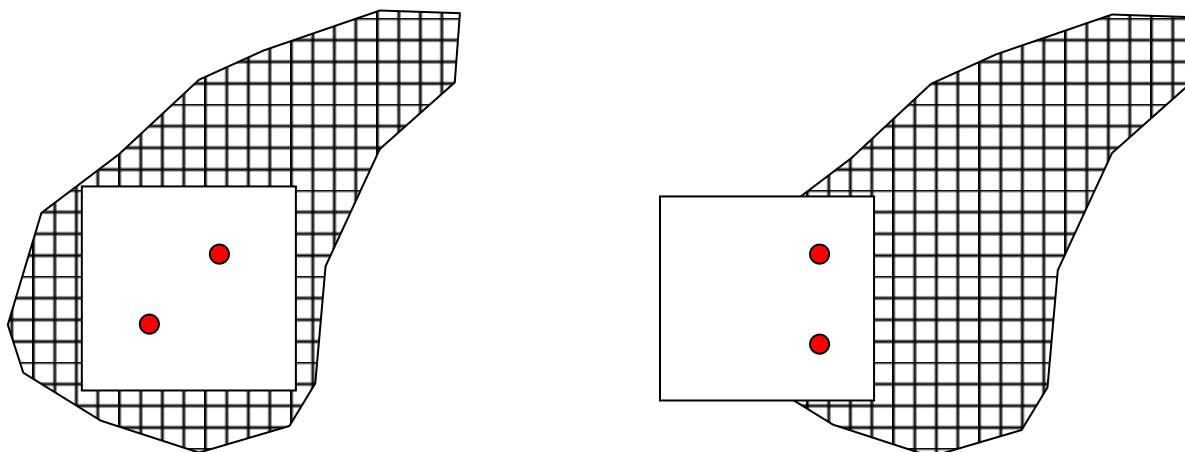
La ubicación concreta de los PDMs a ejecutar, a falta de otras ubicaciones específicas de mayor interés (p.ej. estructuras preferenciales de migración), y en caso que la extensión de la zona contaminada del subsuelo exceda el área ocupada por el edificio, tratará preferentemente de caracterizar la zona central de la cimentación, espaciando proporcionalmente los PDMs a ubicar, ya que en dicha zona las concentraciones esperables son iguales o mayores a las zonas perimetrales.

No obstante, si la zona contaminada del subsuelo (p.ej. la parte distal de un penacho de aguas subterráneas contaminadas) no afecta por igual a toda el área ocupada por el edificio, los PDMs se



ubicarán preferentemente en la zona de solapamiento. Se mantendrá una distancia de al menos 1,5 m con las paredes del edificio.

Figura 7: Ubicación de PDMs en el muestreo de vapores bajo cimentación



En cuadrícula zona del subsuelo contaminada
En blanco planta del edificio a caracterizar
En rojo PDMs adoptados.

Al objeto de no afectar con las perforaciones ninguna infraestructura subterránea crítica de la edificación, puede ser de utilidad el uso de métodos geofísicos (p.ej. georadar) para la ubicación precisa de los PDMs.

La zona de captación de la fase gaseosa del suelo de las sondas de vapor/pozos empleados deben colocarse normalmente a un nivel de profundidad inmediatamente inferior al de la base de la cimentación, no superior a 1 m de profundidad bajo la misma, y normalmente en un intervalo de 15-30 cm.

En edificios con sótano, puede ocurrir que la zona del subsuelo más contaminada entre en contacto con las paredes del sótano, en cuyo caso está justificada la instalación de un PDM en dicha pared, una vez atravesado el muro del edificio y/o ubicar un PDM en el exterior del edificio lindando a dicha pared para ejecutar un muestreo junto a la cimentación, que en ese caso concreto podría ser igual o más representativo que el muestreo bajo cimentación.

4.4.7.5 Muestreo de aire interior

Previamente al muestreo del aire interior (24-72 h aproximadamente), debe llevarse a cabo una retirada de la edificación de aquellas fuentes de compuestos volátiles que podrían enmascarar los resultados, y que sean fácilmente evitables como p.ej., herramientas que funcionen con combustible (p.ej. cortacésped), tabaco, velas, quitaesmaltes, quitamanchas, bolas de naftalina, limpiamuebles, productos varios de limpieza, cortinas de plástico, etc

El equipo PID puede emplearse de manera orientativa en la identificación y localización de tales fuentes, al menos las que implican una mayor tasa de emisión de volátiles.

Por igual motivo, se recomienda durante el muestreo aislar el garaje mediante el sellado de la puerta de comunicación del mismo con otras áreas de la edificación.

Cuando el edificio, por sus características o sus usos, presenta importantes fuentes de los contaminantes a evaluar independientes de la contaminación del subsuelo, el muestreo en su interior no tiene sentido. Esto ocurre por ejemplo en gasolineras, lavanderías, etc.

Para una vivienda unifamiliar se recomiendan un mínimo de 1-2 PDMs, dependiendo si la vivienda dispone o no de sótano. En presencia de sótano, se emplearían preferentemente 2 PDMs, uno de ellos en la planta sótano y otro de ellos en la inmediatamente superior (planta baja), mientras que en ausencia de sótano sería suficiente un único PDM en la planta baja. No obstante, si el sótano presentara compartimentaciones, debería disponerse un PDM en cada una de las estancias diferenciadas.

Para edificios mayores se aumentará el número mínimo de PDMs en función de su superficie según la siguiente tabla:

Tabla 6: Densidad de muestreo de vapores en el interior de edificios

Superficie de la cimentación	Uds.	Número mínimo de PDMs en interior
< 150	m2	1-2
150 - 500	m2	2
500 - 1000	m2	3
1000 - 2000	m2	4
2000 - 5000	m2	5
0,5 - 2,5	Ha	6
2,5 - 10	Ha	7
> 10	Ha	> 9



Con independencia de estos criterios mínimos, se tendrá en cuenta, al igual que en el muestreo bajo cimentación, la necesidad de disponer de PDMs específicos en determinados casos:

- Cuando existan diferentes tipos de cimentación
- En ubicaciones que puedan actuar como vías preferenciales de entrada de vapores (ubicar PDM en las proximidades a dichas vías), como por ejemplo:
 - Unión entre la losa de cimentación y los muros del edificio
 - Grietas visibles en la cimentación
 - Sumideros
 - Fosos de ascensor
 - Puntos de entrada de servicios públicos enterrados
- En caso de compartimentación del edificio para diferentes usos (vivienda, oficinas, guarderías, etc.)
- Existencia de zonas del edificio con diferentes sistemas de ventilación/climatización.
- Existencia de zonas del subsuelo más contaminadas que otras bajo la planta del edificio.

Los dispositivos de muestreo ubicados en el sótano deben ubicarse tan cerca como sea posible de la posible entrada de vapores (p.ej. a nivel del suelo), mientras que en otras plantas se deben ubicar a una altura entre 1-1,5m, representativa de la zona de respiración de los habitantes más sensibles del edificio (p.ej. niños).

La concentración de los contaminantes en el aire interior de los edificios es altamente variable y dependiente de múltiples factores, por lo que se recomienda que el período de muestreo sea cuanto más amplio mejor.

Se suele emplear un muestreo pasivo (a presión subatmosférica) con canister de 6 litros, durante 24 h en edificios residenciales y 8 h en edificios comerciales, o bien tubos sorbentes también pasivos que permiten mayores plazos de muestreo (días o incluso meses según los parámetros). En caso de emplear canister, EPA recomienda la realización de múltiples rondas de muestreo.

En caso de combinarse con el muestreo bajo cimentación, el muestreo del aire interior debería llevarse a cabo previamente a la instalación de los PDMs y la ejecución del muestreo bajo cimentación, para prevenir interferencias de los PDMs ejecutados bajo solera en el aire interior de la edificación.

Alternativamente, se puede llevar a cabo la instalación de las sondas de vapor/pozos para el muestreo bajo cimentación, y dejar transcurrir un tiempo suficiente (de 24 a 72 h para una tasa de renovación de



aire de 0,25 a 1,0 h⁻¹) para la adecuada ventilación de la edificación y su retorno a las condiciones iniciales antes del muestreo. Esta opción permitiría realizar ambos muestreos (bajo cimentación y en interior) de forma simultánea y en los mismos períodos, lo cual resulta recomendable a la hora de interpretar sus resultados de manera conjunta.

Es conveniente realizar un muestreo del aire ambiente exterior a la edificación, con objeto de poner en contexto las concentraciones halladas en el interior de la misma. Para ello se recomienda disponer 1-2 PDMs, pudiendo ser más cuando las áreas a investigar sean elevadas. Los PDMs se ubicarán en zonas alejadas de las posibles fuentes de contaminación del subsuelo así como de emisiones de posibles equipos de remediación instalados en el emplazamiento, con objeto de que las concentraciones obtenidas respondan únicamente a la calidad del aire ambiente. Se harán constar otro tipo de emisiones atmosféricas existentes en los alrededores del emplazamiento que puedan influir en el resultado del muestreo. El muestreo exterior debe realizarse durante un período de muestreo equivalente al muestreo interior, aunque ligeramente anticipado en el tiempo, iniciándolo 1-2 h antes y concluyéndolo 30 min antes, para tratar de reflejar las características del volumen de aire exterior que teóricamente entraría en el edificio durante el muestreo interior con las tasas de renovación de aire del edificio habituales (0,25-1,0 h⁻¹).

Es conveniente, en la medida en que sea posible, que los métodos de muestreo y análisis aplicados al muestreo de aire interior, al muestreo bajo cimentación y el muestreo exterior, sean equiparables para que los resultados sean comparables.

4.4.7.6 Consideraciones de muestreo particulares en la evaluación de la intrusión de vapores a partir de depósitos subterráneos de hidrocarburos del petróleo

EPA recomienda en la evaluación de la intrusión de vapores de hidrocarburos del petróleo en espacios cerrados a partir de depósitos subterráneos, la ejecución de dos tipos de muestreo combinado:

- a) Muestreo junto a la cimentación, lo más cercano posible a la edificación, a dos niveles de profundidad, a nivel somero junto a la base de la cimentación y en profundidad en la proximidad de la zona fuente (nivel de la zona no saturada, por encima de la franja capilar, etc.)
- b) Muestreo bajo cimentación junto con muestreo en el interior del edificio/vivienda

En primera instancia podría llevarse a cabo la primera de las posibilidades, y si los resultados obtenidos no permiten descartar la intrusión de vapores por encima de los valores permitidos, se llevaría a cabo la segunda de las opciones.



La razón de llevar a cabo un doble muestreo dentro de un mismo o similar perfil en la zona fuente y a nivel somero, es la de poder llevar a cabo una evaluación experimental o práctica del factor de atenuación por biodegradación de estos compuestos en la zona no saturada, gracias al cociente entre ambas concentraciones, más representativo del emplazamiento concreto que el empleo de las tasas de degradación contempladas en los modelos.

Estos contaminantes, aparte de sufrir una atenuación en sus concentraciones en el ascenso por difusión a través de la zona no saturada, sufren, de manera más acusada que otros compuestos volátiles (p.ej. clorados), una significativa reducción por biodegradación, fundamentalmente aerobia, la cual tradicionalmente no ha sido tenido en cuenta en los modelos de transporte más conservadores empleados (Johnson & Ettinger) en las evaluaciones de riesgo.

Más detalles sobre el fenómeno de esta biodegradación, y la forma de emplear el factor de atenuación determinado experimentalmente en el cálculo de los riesgos existentes por inhalación en el interior de la edificación, puede consultarse en el documento reconocido “Guía de evaluación de riesgos para salud humana en suelos potencialmente contaminados”.

Cuando las fugas son recientes, la biodegradación está aún en un estado inicial y la demanda de oxígeno puede experimentar altibajos, por lo que se recomienda que el muestreo de gases del suelo sea repetido en el tiempo, para confirmar que la biodegradación es suficiente y constante en el tiempo para descartar la intrusión de vapores.

Junto a estas recomendaciones de muestreo, EPA aporta algunos supuestos en los que considera, en base al histórico de datos existentes, bastante improbable la intrusión de vapores de hidrocarburos procedentes de fugas de depósitos subterráneos en el interior de edificios gracias a la biodegradación. Estos supuestos son los siguientes:

Tabla 7: Profundidades de contaminación con escasa probabilidad para la intrusión de vapores en espacios cerrados

Estado físico de la contaminación	Profundidad de suelo entre la fuente y la base de la cimentación (m)	Dimensiones laterales del edificio (m)
Contaminación en fase disuelta	> 2	Sin restricción
Contaminación en fase libre ligera libre o residual (LNAPL)	> 4,6	< 20

Las distancias verticales consideradas se entienden entre el punto más bajo de la estructura o edificio

expuesto a la intrusión de vapores y el punto más elevado del espesor de suelos afectados por hidrocarburos o el nivel histórico más elevado del nivel piezométrico. Si las variaciones del nivel piezométrico no se conocen, debería adoptarse un criterio conservador y considerar que el nivel determinado durante la investigación pudiera ascender (p.ej. 1 m) a la hora de compararlo con las profundidades orientativas indicadas.

En el establecimiento de estas profundidades se asume que:

- El subsuelo, compuesto por material detrítico poroso, es homogéneo e isótropo. En la profundidad referida en la tabla anterior, no se contemplarían niveles de roca consolidada, antiguas cimentaciones, etc.
- La actividad microbiana en este suelo es normal, no existen limitaciones a la misma. El suelo dispondría de la humedad mínima necesaria y presentaría una zona aeróbica donde el oxígeno atmosférico penetraría sin problemas.
- No existen vías preferentes de migración de volátiles, ya sean antrópicas (saneamientos, zanjas, etc.) o naturales (fracturas, superficies de estratificación y/o niveles litológicos con mayor permeabilidad inclinados, cavidades kársticas, etc.).
- La fuente no se sitúa en las proximidades de la base de la cimentación (p.ej. < 0,6 m).
- El suelo comprendido entre la fuente de los vapores y la base del edificio a considerar debe ser suelo “limpio”, que no quiere decir totalmente exento de contaminación, sino que no vaya a limitar la cantidad de oxígeno disponible. Algunas fuentes emplean un criterio orientativo de < 250 mg/Kg de TPH para tal fin, aunque también dependerá de la continuidad y extensión de estos niveles de suelos intermedios.

Para certificar este extremo se debe monitorizar en continuo el perfil del suelo hasta la fuente contaminada, indicándose medidas de PID cada 15 cm y el análisis en laboratorio de todos los niveles en los que se obtengan valores in situ de ≥ 100 ppm.

Se contemplan dos supuestos diferentes según haya o no fase libre ligera (LNAPL) porque los compuestos que emanan de una pluma disuelta son más ligeros y volátiles (p.ej. BTEX) y más susceptibles de biodegradación que a partir de fase libre, donde son significativos los compuestos alifáticos de mayor peso molecular y más insolubles, de menor tasa de biodegradación.

En los supuestos con presencia de LNAPL se contempla tanto una fase libre móvil que migra hacia el nivel freático y se desplaza sobre las aguas subterráneas, como una fase libre residual tapizando los poros de la zona no saturada sin llegar a fluir.



La fase libre móvil es fácil de identificar en los piezómetros, pero no tanto la fase libre residual. Según EPA, se debe considerar que existe fase libre residual si existen evidencias directas (testigos de sondeo saturados, irisaciones en el agua subterránea, etc) o evidencias indirectas a partir de las siguientes concentraciones guía en las muestras de suelo y agua subterránea:

Tabla 8: Criterios EPA orientativos para la existencia de LNAPL

	Benceno	TPH
Concentraciones en suelo (mg/Kg)	> 10	>100 (fugas recientes) > 250 (combustible degradado)
Concentraciones en agua subterránea (mg/l)	> 5	> 30

No obstante, estas profundidades de exención deben ser tomadas como valores meramente orientativos, ya que existen diferentes motivos, no infrecuentes, por los cuales dichas profundidades pudieran no ser suficientes para permitir una adecuada biodegradación, bien porque no se cumplan algunos de los supuestos de partida, bien porque las características de algunos combustibles requieren una mayor demanda de oxígeno para su biodegradación. Estas distancias de exención, según la propia EPA, no deben tomarse en consideración al menos en las siguientes circunstancias:

- Las fuentes de contaminación no responden a un depósito subterráneo de reducidas dimensiones. Estas profundidades máximas de investigación no son aplicables p.ej. en una refinería, terminales portuarias, instalaciones con depósitos en superficie, etc.
- Existe una importante generación de metano con la consiguiente demanda adicional de oxígeno y la posible advección del aire del subsuelo. Esto puede producirse si en el emplazamiento se manipulan o se han manipulado combustibles con una importante componente de etanol (p.ej. E10, E20 etc), así como en vertederos.
- Los combustibles almacenados, actualmente o en el pasado, presentan aditivos con escasa biodegradación, como MTBE, o degradación no suficientemente estudiada, como los limpiadores de Pb etil dibromuro (EDB) y 1,2-Dicloroetano (1,2-DCA). Estos últimos son al parecer aún corrientes en combustibles de aviación.
- Existe una elevada concentración de carbono orgánico en los suelos (turbas y similares)
- El flujo de oxígeno atmosférico se ve limitado en profundidad, por tratarse p.ej. de un edificio de grandes dimensiones ($L > 20$ m con LNAPL libre o residual), existir una elevada superficie pavimentada en torno al edificio, o una capa litológica confinante o semiconfinante (capas



superficiales de limos, arcillas....), tratarse de un suelo con una elevada humedad, etc..

- Las condiciones del subsuelo no son favorecedoras para la actividad microbiana. Pej. humedad del suelo inferior al 2% o al punto de marchitez permanente, litología a base de gravas y arenas gruesas, preponderancia de cantos y bloques de roca consolidada, etc.
- El suelo o las aguas subterráneas afectadas se sitúan en las proximidades de la base de la cimentación (p.ej. $< 0,6$ m).
- Existen o pudieran existir vías preferentes de migración de volátiles, ya sean antrópicas (saneamientos, zanjas, etc.) o naturales (fracturas, superficies de estratificación y/o niveles litológicos con mayor permeabilidad inclinados, cavidades kársticas, etc.).

Para poder tener en cuenta estas profundidades orientativas aportadas por EPA, la investigación del emplazamiento debe aportar suficiente información que permita certificar la existencia de suelo limpio entre la base del edificio y la fuente en un punto de muestreo junto a la cimentación del mismo, y descartar con seguridad todas las circunstancias consideradas anteriormente, así como otras que se pudieran presentar y que limitaran la biodegradación de los contaminantes presentes.

Estas profundidades por otro lado hacen referencia únicamente a la probabilidad de producirse una infiltración de vapores de hidrocarburos procedentes de depósitos subterráneos en espacios cerrados. No deben entenderse como profundidades orientativas de perforación para el conjunto de la investigación, ya que de existir aguas subterráneas en el emplazamiento, éstas deben estudiarse con otros objetivos, como ya se ha indicado anteriormente en el presente documento.

4.5 ENSAYOS ANALÍTICOS A REALIZAR EN LA CARACTERIZACIÓN

4.5.1 Selección de los parámetros analíticos

Los ensayos analíticos a realizar sobre las muestras obtenidas en la caracterización exploratoria o de detalle, serán aquellos que respondan a la composición de las materias, productos y residuos que han podido afectar a la calidad de los suelos y/o las aguas subterráneas, de acuerdo con las conclusiones de la investigación preliminar.

Si el punto de muestreo se localiza en un área con riesgo de contaminación de origen conocido (depósitos) la batería analítica podrá ceñirse a la naturaleza de las sustancias concretas asociadas a esa área de contaminación.



Si la composición de las sustancias no se conoce con absoluta certeza, o pudieran estar involucradas otras sustancias contaminantes diferentes a las conocidas, se realizará, al menos en investigación exploratoria, una batería analítica más completa.

Si el punto de muestreo se localiza en un área con riesgo de contaminación de origen difuso o no conocido, la batería analítica deberá ser lo más completa posible, al menos en investigación exploratoria, de acuerdo con la naturaleza de las sustancias manejadas o producidas en la totalidad del proceso productivo.

El Decreto 18/2015 contempla NGRs diferenciados para Cr III y Cr VI, así como para Hg elemental y Hg inorgánico, con objeto de poder realizar una valoración más ajustada de los riesgos por estos compuestos, ya desde el nivel I, debido a las diferencias acusadas en su toxicidad.

Se puede optar por dos sistemáticas de trabajo:

- a) Analizar Hg y Cr total, y aplicar los NGRs más conservadores (Hg elemental y Cr VI), procediendo a la especiación en caso de obtenerse superaciones de dicho NGR.

Si los plazos recomendados para los diferentes ensayos lo permiten, como puede ser en el caso del Cr, los ensayos de especiación pueden realizarse sobre las mismas muestras de la investigación exploratoria, una vez conocida y evaluada la concentración total.

En caso contrario habría de realizarse una ampliación de esta caracterización previamente a la realización del ACR de nivel II, o bien tras la realización de este ACR en una fase detallada del estudio.

- b) Proceder a la especiación desde la planificación de la investigación exploratoria.

La especiación de Cr es relativamente fácil, ya que es factible determinar Cr VI por métodos acreditados. Se adoptará como valor de Cr III la diferencia con el Cr total. Aunque teóricamente pueden existir otros estados de oxidación, a efectos prácticos se considera que serán minoritarias. Se recomienda realizar esta especiación desde el inicio o bien condicionada a los resultados de Cr total sobre las muestras de la investigación exploratoria.

La especiación del Hg es algo más compleja, pues los métodos analíticos tienen actualmente un bajo grado de implantación en el mercado y un coste analítico significativo, por lo que se puede llevar a cabo en una ampliación o investigación de detalle, en aquellos PDMs donde se hayan obtenido superaciones



de NGR ó de los riesgos permitidos a causa de este compuesto.

Si se trata de un área de afección extensa, podrán seleccionarse determinados PDMs como representativos de cada uno de los sectores diferenciados en el emplazamiento para llevar a cabo en ellos la especiación, y aplicar el porcentaje de fraccionamiento Hg^0/Hg total determinado al resto de PDMs. Para ello no deben existir diferencias apreciables entre ellos en cuanto a litologías, pH, etc. y el PDM seleccionado como representativo será aquel que presente mayores concentraciones de Hg total.

Si existen evidencias previas de elevadas concentraciones de Hg en el emplazamiento, puede ser conveniente no obstante plantear la especiación desde el inicio. En áreas extensas podrán emplearse igualmente determinados PDMs representativos, que serán aquellos que presenten mayores evidencias de afección.

En caso de llevar a cabo la especiación de Hg, se analizará igualmente la concentración de metilmercurio aún cuando actualmente no exista NGR.

Si algunos de los parámetros analizados en la fase exploratoria no son detectados, o se mantienen significativamente por debajo de los niveles normativos y su influencia es mínima en los riesgos acumulados identificados, podrán suprimirse en la investigación de detalle.

Cuando en la investigación detallada se muestreen otros medios de exposición (aguas superficiales, aire ambiente), los parámetros analizados serán aquellos que por sí mismos o de forma conjunta, contribuyan de forma significativa a los riesgos acumulados calculados previamente.

Se deberá justificar en todo momento la selección de parámetros realizada.

4.5.2 Calidad de los ensayos

Los ensayos de laboratorio realizados dentro de la investigación deberán ser realizados, siempre que existan en el mercado, por laboratorios de ensayo acreditados por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), u otro organismo de acreditación internacional que haya firmado acuerdo de reconocimiento mutuo con ésta, según la norma UNE-EN ISO/IEC 17025.

Se podrán emplear equipos “in situ” para valorar el grado de afección de las diferentes zonas del emplazamiento, y acomodar en base a sus resultados la densidad de muestreo planteada. En cualquier caso, los ensayos con equipos “in situ” nunca serán sustitutivos de los ensayos de laboratorio, que deberán realizarse en los puntos de muestreo finalmente seleccionados, y que con mayor o menor



densidad, deberán cubrir la totalidad de la superficie del emplazamiento con riesgo de afección.

Esta regla no será de aplicación si la entidad ostenta para los análisis correspondientes la acreditación como laboratorio de ensayo “in situ” por la norma UNE-EN ISO/IEC 17025, o bien realiza estos ensayos con igual criterio de exigencia bajo acreditación UNE-EN ISO/IEC 17020, y dichos métodos poseen una incertidumbre de medida comparable a la de los métodos de laboratorio.

Los parámetros analíticos de grupo, (por ejemplo los compuestos organohalogenados extraíbles –EOX-) deberán ser tratados de forma similar a la utilización de ensayos “in situ”, es decir, como un criterio orientativo para evaluar el grado general de afección de determinadas zonas, y acomodar densidades de muestreo y/o baterías analíticas a realizar en determinadas áreas, centrando los esfuerzos de muestreo y de análisis cuantitativos posteriores en aquellas zonas donde se obtengan valores cuantificables de estos parámetros. No obstante, nunca serán parámetros sustitutivos de los ensayos individualizados por analitos, que será obligado realizar en todas aquellas áreas con evidencias de afección.

4.5.3 Características de los métodos empleados

Los rangos de concentración acreditados de los métodos analíticos empleados deberán ser tales que se pueda evaluar conformidad en todos los casos, de acuerdo con el apartado de “Evaluación de los resultados en estudios de caracterización” de este documento.

Concretamente, los límites inferiores de cuantificación deberán ser inferiores a los niveles normativos de aplicación. Los límites superiores de cuantificación de los métodos analíticos de suelos serán al menos 100 veces superiores a los niveles genéricos de referencia.

En el caso de las aguas subterráneas, se entenderá que los límites de cuantificación no lleguen a alcanzar los valores objetivo holandeses en algunos casos, ya que se trata de límites propios de aguas naturales y tal como recoge la propia Circular holandesa algunos de ellos inferiores a las capacidades actuales de los laboratorios. No obstante se procurará emplear rangos de medida bajos propios de aguas naturales, con límites de cuantificación claramente inferiores a los niveles de intervención y en líneas generales más próximos a los niveles objetivo.

Cualquier otra desviación de este requisito será de carácter excepcional, motivada por la no existencia en el mercado de laboratorios acreditados con la capacidad de medida requerida (p.ej. actualmente en PCB), y debidamente justificada en el informe con las evidencias que correspondan.



En estos casos, se advertirá claramente en el informe, sobre qué valores emitidos por el laboratorio no es posible evaluar conformidad debido a esta limitación.

En el análisis de hidrocarburos totales de petróleo se emplearán métodos, o combinaciones de métodos, que permitan evaluar la totalidad de hidrocarburos presentes, tanto las fracciones más ligeras o volátiles (< C10), especialmente en presencia de gasolinas y gasóleos además del crudo de petróleo, como el resto de fracciones intermedias y pesadas (C10-C35 o C10-C40) y en algunos casos más pesadas aún (C35-C44+), como puede ocurrir en este último caso con el crudo de petróleo, betunes, etc.

Sin tener que ceñirse a estos métodos concretos, la norma ISO 11504 “Soil quality – Assessment of impact from soil contaminated with petroleum hydrocarbons” hace referencia a los métodos ISO disponibles para la cuantificación de estas fracciones. Esta norma ISO, basándose en el documento “Risk-Based Decision-Making for Assessing Petroleum Impacts at Exploration and Production Sites” (PERF-US.DOE), propone una modificación del método cromatográfico del TPHCWG para incorporar la cuantificación de los TPH hasta EC44, pudiendo determinar la fracción EC>44 por destilación.

Sobre el total de muestras de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) a analizar, y si los resultados determinan o se prevé que determinen la necesidad de llevar a cabo un análisis de riesgos de acuerdo con el apartado de “Evaluación de los resultados en estudios de caracterización”, se llevará a cabo la cuantificación por escisión o diferenciación de cadenas alifáticas y aromáticas por intervalos del número de carbonos descrita en el apartado de “Ensayos a contemplar para el análisis de riesgos”.

En la determinación analítica de metales totales, se emplearán métodos previos de digestión ácida, preferentemente con agua regia, a menos que el método analítico o instrumental empleado desaconseje esa mezcla.

Para la especiación del Hg, los métodos actualmente más recomendables son los siguientes:

- EPA 3200 Extracción secuencial selectiva capaz de individualizar cuatro fracciones: extractable orgánica (que engloba las formas organometálicas), extractable inorgánica, no extractable semi-móvil (que incluiría el Hg elemental y parte de Hg^{+2}) y no extractable no móvil.
- Método de extracción secuencial de 5 pasos (Nicholas S. Bloom et al). Determina 5 fracciones: soluble en agua, soluble en ácido débil, organocomplejos (incluyendo organometálicos), complejos fuertes (incluyendo Hg elemental y complejos de Hg^{+2}), y ligado a la fase mineral.



- Determinación del Hg elemental mediante desorción térmica a temperatura controlada con arrastre de gas inerte. Existen varias variantes de este método. Se puede cuantificar el Hg de los vapores desprendidos atrapados en trampa de oro, en tubo de hopcalita, etc. Aunque son preferibles las primeras opciones, también se puede determinar el Hg total en la muestra antes y después de su desorción, y calcular el Hg elemental por diferencia.

Algunos de estos métodos están aún en fase de implantación y no se encuentran normalizados. Los métodos para la determinación de la fase volátil del mercurio no son completamente selectivos, ya que tanto las extracciones selectivas como la desorción tienen cierto grado de solape con otras formas inorgánicas de mercurio (Hg^{+2}). No obstante, estos solapes siempre provocarán que la cuantificación de la fase volátil se haga por exceso, y por tanto de forma conservadora.

Los ensayos sobre muestras de aguas superficiales y de aire deberán realizarse conforme a los métodos reflejados en sus correspondientes normativas de aplicación. En el caso de las muestras de aire, en ausencia de dichos métodos para los parámetros en cuestión, se tratará de emplear métodos EPA o en su defecto métodos correspondientes al campo de la salud laboral (métodos NIOSH, etc.).

En ambos casos sus límites de cuantificación deben ser inferiores a los valores normativos existentes y a las concentraciones en el punto de exposición modelizadas en al ACR exploratorio originarias del riesgo que motiva su muestreo.

4.5.4 Uso de las incertidumbres de ensayo

Se tendrán en cuenta las incertidumbres de los resultados analíticos en la evaluación de la conformidad. Se entenderá que un resultado es conforme al valor normativo, si su valor más la incertidumbre de ensayo, es inferior a dicho límite normativo.

Se entenderá que un resultado es no conforme al valor normativo, si su valor menos la incertidumbre de ensayo, es superior a dicho límite normativo.

Si el intervalo comprendido por el valor del resultado más/menos su incertidumbre, incluye el valor límite normativo, no se podrá afirmar si el resultado es conforme o no conforme. En esos casos se indicará que no es posible declarar la conformidad a causa de la incertidumbre del resultado y su proximidad al valor normativo.

Los informes de los laboratorios que realicen los ensayos vendrán marcados expresamente como



acreditados (conforme al documento CEA-ENAC-01), y sus resultados analíticos vendrán acompañados de sus incertidumbres de ensayo.

4.5.5 Ensayos a contemplar para el análisis de riesgos

Si de la etapa de caracterización se prevé concluir o se concluye, de acuerdo con el apartado de “Evaluación de los resultados en estudios de caracterización”, la necesidad de llevar a cabo un análisis de riesgos, se llevarán a cabo una serie de ensayos analíticos y pruebas experimentales necesarias para la realización del citado análisis.

En caso de no realizarse dichas pruebas durante la caracterización exploratoria y determinarse en base a los resultados de la misma la necesidad de llevar a cabo un análisis de riesgos, se llevará a cabo previamente a dicho ACR una ampliación de la caracterización o una caracterización complementaria para recopilar la información necesaria, no siendo admisible el uso de valores por defecto sobre variables que son fácilmente determinables en campo.

Se comentan a continuación los ensayos y pruebas que son imprescindibles en la mayoría de los casos. También se citan algunos otros ensayos que pueden realizarse en investigación de detalle. Para mayores detalles puede consultarse el documento reconocido “Guía de evaluación de riesgos para salud humana en suelos potencialmente contaminados”.

4.5.5.1 Caracterización de los hidrocarburos del petróleo (PHCs)

Se llevará a cabo una caracterización de los hidrocarburos totales del petróleo distribuidos por intervalos del número de carbonos presentes en sus cadenas, diferenciando entre cadenas de tipo alifáticas y aromáticas. Se recomienda realizar dicha caracterización en todas las muestras, o al menos en un 50% de ellas aproximadamente. Estas muestras se seleccionarán de manera que sean representativas de la totalidad de las diferentes áreas afectadas por hidrocarburos en el emplazamiento. La diferenciación de estas cadenas se realizará conforme a los intervalos que vayan a ser posteriormente empleados en el análisis de riesgos, que normalmente serán las siguientes:

Tabla 9: Diferenciación habitual de TPH en fracciones alifáticas/aromáticas

TPH Alifáticos C ₅ -C ₆	TPH Aromáticos C ₅ -C ₇
TPH Alifáticos C ₆ -C ₈	TPH Aromáticos C ₇ -C ₈
TPH Alifáticos C ₈ -C ₁₀	TPH Aromáticos C ₈ -C ₁₀
TPH Alifáticos C ₁₀ -C ₁₂	TPH Aromáticos C ₁₀ -C ₁₂
TPH Alifáticos C ₁₂ -C ₁₆	TPH Aromáticos C ₁₂ -C ₁₆
TPH Alifáticos C ₁₆ -C ₂₁	TPH Aromáticos C ₁₆ -C ₂₁



TPH Alifáticos C₂₁-C₃₄TPH Aromáticos C₂₁-C₃₅

Si se va a emplear en el análisis de riesgos una modelización de la intrusión de vapores contemplando la biodegradación de estos compuestos, se debe llevar a cabo una completa caracterización de todos los PHCs que a nivel individual forman parte de la mezcla, no sólo los de aquellos compuestos que por su toxicidad ya son normalmente estudiados (BTEX, PAHs, MTBE, ETBE, trimetilbencenos, etc.), sino también de aquellos otros que contribuirán a la demanda de oxígeno durante la biodegradación (p.ej. metano, C4-C5, etc).

En aquellos emplazamientos con presencia de fracciones de TPH más pesadas (C>35), será de interés lógicamente incorporar la cuantificación de los intervalos más pesados de acuerdo, p.ej., con la metodología propuesta por PERF-U.S.DOE. En ocasiones, estas fracciones se detectan en los ensayos de muestras tomadas en emplazamientos para los que en principio no se esperan fracciones tan pesadas, y cuya cuantificación es igualmente procedente.

4.5.5.2 Caracterización textural del suelo

Se llevará a cabo una caracterización de la granulometría de los diferentes horizontes de materiales detríticos naturales o antrópicos identificados en el perfil del emplazamiento.

El número de PDMs a contemplar para esta caracterización será proporcional a la heterogeneidad del terreno, así como al tamaño de la parcela investigada. Como mínimo se debería realizar dicha caracterización en un 25% de los PDMs contemplados en el plan de muestreo.

El ensayo debe realizarse sobre la fracción gruesa y fina, de manera que permita realizar la clasificación textural del suelo.

Las fracciones granulométricas determinadas, deberían ir en consonancia con el sistema de clasificación textural en base al cual se vaya a apoyar el subsiguiente análisis de riesgos para establecer las propiedades del suelo que influyen en la movilización y el transporte de los contaminantes. En su defecto, uno de los sistemas más utilizados es el del Departamento de Agricultura americano (método USDA). Para más información ver lo establecido al respecto en el documento reconocido “Guía de evaluación de riesgos para salud humana en suelos potencialmente contaminados”.

4.5.5.3 pH y Carbono orgánico



Se llevará a cabo igualmente una caracterización del pH y el carbono orgánico de los suelos del emplazamiento.

El número de PDMs a contemplar será igualmente proporcional a la heterogeneidad del terreno y al tamaño de la parcela, tomando como orientación un número similar al 25% de los PDMs contemplados en el plan de muestreo, prestando especial atención a aquellos sectores en los que sea previsible que cambien dichas características (reducción de pH por mayores contenidos en metales, zonas con mayor o menor vegetación en superficie, etc.).

Dentro de cada perfil seleccionado se tomará una muestra superficial y otra u otras en profundidad en los niveles que quepa diferenciar, sobre todo en los que se puedan haber detectado evidencias de afección.

En presencia de aguas subterráneas se tomará asimismo una muestra de suelo de la zona saturada para la determinación del carbono orgánico en los PDMs seleccionados, y se determinará el pH de las aguas subterráneas en todos los piezómetros instalados.

4.5.5.4 Piezometría

También se llevará a cabo la medida de la profundidad del nivel freático, y en su caso de producto libre si lo hubiera (LNAPL ó DNAPL) mediante el uso de sonda interfase.

Las medidas serán realizadas de forma más o menos simultánea en todos los piezómetros instalados, en condiciones de estabilidad de los niveles. Para ello se debe dejar transcurrir el tiempo necesario para la recuperación total de niveles tras cualquier bombeo realizado (p.ej. en el desarrollo o el purgado).

Se deberán contemplar varias campañas de medida si por la casuística del emplazamiento pudieran darse variaciones periódicas de nivel, por ejemplo por estar sometidas las aguas a influencia mareal, existencia de bombeos próximos intermitentes, etc.

Las profundidades de nivel determinadas se restarán a las cotas determinadas por la topografía de precisión para los puntos de referencia empleados en las medidas (boca de tubería, boca de arqueta, etc.), con objeto de determinar las cotas reales (o relativas respecto a un nivel de referencia común) del nivel piezométrico en cada PDM y momento de la medida, pudiendo establecerse mapas de isopiezas por algún método de interpolación estadísticamente válido, o por interpolación lineal si se dispone de pocos puntos de medida.



En presencia de fase libre ligera (LNAPL), las elevaciones del nivel piezométrico sobre el nivel de referencia adoptado deben corregirse por el efecto de depresión que ejerce dicha fase libre. De acuerdo con el procedimiento de EPA SERAS 2043 Manual water level measurements, la cota piezométrica debe ser incrementada en una cuantía igual al espesor de fase libre multiplicada por su densidad, adoptando un valor por defecto para ésta de 0,8 en caso de desconocerse.

4.5.5.5 Conductividad hidráulica de la zona saturada

Se llevará a cabo la estimación de la conductividad hidráulica del terreno en varios de los piezómetros instalados, de tal forma que las medidas sean representativas del conjunto del emplazamiento y de las diferencias litológicas que hayan podido identificarse en las columnas de sondeo.

Esta estimación se llevará a cabo mediante ensayos de bombeo y/o recuperación siempre que ello sea posible, o en su defecto mediante slug tests.

Estos ensayos de conductividad corresponderán al nivel de zona saturada donde se prevé la mayor contaminación y en el que se habrá llevado a cabo el muestreo, que normalmente, salvo excepciones, corresponderá al acuífero más superficial en régimen libre. Caso de estimarse durante la investigación el semiconfinamiento o el confinamiento del nivel de interés por el ascenso del nivel del agua tras la perforación sobre niveles más impermeables, se tendrá en cuenta para la interpretación y evaluación de los resultados. Se emplearán métodos de cálculo adaptados a las características del nivel de zona saturada investigado, aportando los cálculos realizados y/o las salidas gráficas del software empleado.

4.5.5.6 Otros ensayos adicionales

En caso de que la caracterización sea de detalle debe contemplarse además la posibilidad de realizar algunos otros ensayos adicionales, todos ellos con la debida representatividad espacial y/o temporal, como los siguientes:

- a) Determinaciones adicionales de las propiedades del suelo que influyan en la volatilización de contaminantes (p.ej. porosidad) o en la lixiviación hacia la aguas subterráneas (p.ej. conductividad hidráulica vertical en zona no saturada)
- b) Ensayos de disponibilidad oral humana (bioaccesibilidad in vitro)

Se empleará preferentemente el ensayo UBM-BARGE en fase gástrica.



- c) Ensayos de disponibilidad mediante lixiviación a las aguas.
- d) Ensayos adicionales de especiación para algunos contaminantes (As, Sn, etc.)
- e) Medidas de partículas en suspensión en inmisión de espacios abiertos.
- f) Medición de contaminantes en alimentos posiblemente afectados por las concentraciones del suelo.

El plan de muestreo para la caracterización de estas variables debe ser representativo de las diferentes zonas consideradas o a considerar en el análisis de riesgos, las diferentes litologías o materiales de relleno causantes de los riesgos que se pretenden afinar, valores de pH y carbono orgánico del suelo registrados, etc.

Para mayor información sobre algunas de estas determinaciones, consultar el documento reconocido “Guía de evaluación de riesgos para salud humana en suelos potencialmente contaminados”.

4.6 EVALUACIÓN DE LA CONFORMIDAD DE LOS RESULTADOS EN ESTUDIOS DE CARACTERIZACIÓN

4.6.1 Evaluación de la conformidad sobre la calidad de los suelos

4.6.1.1 Evaluación de la caracterización cuando el objeto de protección es la salud humana

Los resultados analíticos de las caracterizaciones de suelos se han de comparar con los niveles genéricos de referencia del Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, correspondientes al uso del suelo, así como con los niveles genéricos de referencia para elementos metálicos y traza establecidos en el anexo IV del Decreto 18/2015, de 27 de enero, por el que se aprueba el reglamento que regula el régimen aplicable a los suelos contaminados, o normativa que los sustituyan o modifiquen.

Tal y como contempla el citado Decreto, para zonas de características geológicas particulares en las que las concentraciones naturales de elementos traza presentes en los suelos sean superiores a los NGR, podrán establecerse diferentes valores de referencia. Para ello, se seguirá lo recogido en la norma EN ISO 19258:2011 Calidad del suelo. Directrices para la determinación de los valores de fondo (ISO 19258:2005).

También se comprobará el valor de 50 mg/kg para la evaluación de los resultados de hidrocarburos totales del petróleo, de acuerdo con el Anexo IV del Real Decreto 9/2005, de 14 de enero. En ausencia de otras indicaciones posteriores a este R.D., este valor se contrastará con el sumatorio de todos los hidrocarburos presentes, tanto fracciones ligeras ($C<10$) como pesadas ($C>10$). Cuando se disponga de



resultados globales y de fraccionamiento de TPH en una misma muestra, se llevará a cabo una evaluación conservadora de dichos resultados si las diferencias entre ambos implicara una evaluación diferente de la conformidad.

Asimismo, en tanto en cuanto la normativa estatal o autonómica andaluza no establezca NGRs particulares para estos compuestos, y a nivel de evaluación técnica, se emplearán los siguientes niveles de referencia:

Tabla 10: NGRs provisionales para parámetros orgánicos no contemplados en RD 9/2005

Parámetro	NGR Uso industrial	NGR Uso urbano	NGR Otros usos
MTBE ⁽¹⁾	100	20	2
ETBE ⁽¹⁾	20	2	0,2
Óxido de difenilo ⁽²⁾	75	8	0,8
Difenilo ⁽²⁾	10	7	3

(1) Fuente: Niveles Genéricos de Referencia (NGRs) para metil terbutil eter (MTBE) y etil terbutil eter (ETBE) en suelos. Universidad de Málaga. Marzo 2013.

(2) Fuente: Decreto 49/2015, de 30 de marzo, por el que se regula el régimen jurídico de los suelos contaminados en la Comunidad Autónoma de Extremadura.

Se tendrán en cuenta los NGRs aplicables a los usos reales del suelo, así como los que oficialmente puedan constar (planeamiento, catastro,...) si es que fueran diferentes.

En las caracterizaciones ligadas a cambios de uso, los niveles genéricos de referencia a emplear serán aquellos que correspondan con el nuevo uso del suelo: uso industrial, uso urbano u otros usos, de acuerdo en estos últimos casos con la planificación urbanística existente o en fase de aprobación.

En otras ocasiones la caracterización puede no estar motivada estrictamente por un cambio de uso, pero sí se conoce que para la zona existen nuevos usos proyectados en el planeamiento vigente o en elaboración. En esos casos se emplearán para la evaluación de los resultados los NGRs correspondientes al uso actual, y adicionalmente, los NGRs correspondientes al uso proyectado.

En caso de que el resultado de alguno de los contaminantes estudiados superase los niveles genéricos de referencia aplicables (teniendo en cuenta la incertidumbre del resultado), se declarará la no conformidad de la calidad ambiental de los suelos del emplazamiento con dichos valores, especificando el uso considerado, e indicando como necesaria la realización de un análisis cuantitativo de riesgos.



También se emplearán como niveles de comparación, los resultantes de multiplicar por 100 los valores de los niveles genéricos de referencia. En aquellos casos en que se superen dichos valores, el órgano competente, en ausencia de un análisis de riesgos, podrá declarar como contaminado el suelo, según lo indicado en el Anexo III del R.D. 9/2005.

En la evaluación de los resultados (y en la portada del informe) quedará suficientemente clara cuál es la zona de las instalaciones que se están evaluando, y si corresponde a una etapa exploratoria o de detalle de la investigación.

En instalaciones industriales en activo en las que no se haya podido llevar a cabo la caracterización de ciertas zonas por motivos físicos, quedará claro igualmente cuáles son dichas zonas, y que dicho estudio será obligado en caso de remodelación o clausura de la actividad.

4.6.1.2 Evaluación de la caracterización cuando el objeto de protección son los ecosistemas

Si el objeto de protección fueran los ecosistemas, se emplearán los niveles genéricos de referencia aplicables del Anexo VI del Real Decreto 9/2005, y/o el resultado de los bioensayos mencionados en el Anexo III.2 de ese mismo Real Decreto 9/2005 aplicables al tipo de organismos (del suelo y/o acuáticos) presentes en el ecosistema a proteger en el entorno del emplazamiento.

En caso de que el resultado de alguno de los contaminantes estudiados superase los niveles genéricos de referencia aplicables, o bien (uno de los dos requisitos) se detectara toxicidad en los bioensayos referidos, se declarará la no conformidad de la calidad ambiental de los suelos del emplazamiento, indicando como necesaria la realización de un análisis cuantitativo de riesgos.

Para dar conformidad a la calidad ambiental del suelo se deben obtener resultados analíticos inferiores a los NGRs aplicables del Anexo VI y (ambos requisitos) bioensayos del Anexo III.2 sin resultados de toxicidad.

Igualmente se emplearán como niveles de comparación, los valores de concentración letal efectiva media (CL(E)50) de 10 mg/g o 10 ml/l, para los resultantes de los bioensayos mencionados en el Anexo III.2, según correspondan a organismos del suelo o a organismos acuáticos, respectivamente. En aquellos casos en que se superen dichos valores, el órgano competente, en ausencia de un análisis de riesgos, podrá declarar como contaminado el suelo.

4.6.2 Evaluación de la conformidad sobre la calidad de las aguas subterráneas

Los resultados analíticos obtenidos en las muestras tomadas de aguas subterráneas, deberán ser



comparados tanto respecto a la calidad de las aguas de los puntos de referencia que haya sido factible instalar tomados aguas arriba del emplazamiento potencialmente contaminante, como respecto a la normativa vigente en la materia.

Los valores normativos prioritarios para su consideración son aquellas normas de calidad contempladas a nivel estatal en el RD 1514/2009, de 2 de octubre, por el que se regula la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro, los valores umbral que estén recogidos en el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica en la que se ubique el emplazamiento investigado, así como los criterios de calidad definidos en el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, cuando sea de aplicación en el emplazamiento.

En cuanto a los planes hidrológicos, en la actualidad, los valores umbral a considerar en las diferentes demarcaciones hidrográficas incluidas en el territorio andaluz son las siguientes:

Demarcación hidrográfica del Guadalquivir.

Los valores umbral de esta demarcación se definen actualmente en el Anexo VII Apéndice 6 del Real Decreto 1/2016, de 8 de enero, por el que se aprueba la revisión de los Planes Hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Occidental, Guadalquivir, Ceuta, Melilla, Segura y Júcar, y de la parte española de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Oriental, Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana y Ebro.

Demarcación hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas.

Los valores umbral de esta demarcación se definen actualmente en el Anexo 3.3 de la Orden de 23 de febrero de 2016, por la que se dispone la publicación de las determinaciones de contenido normativo del Plan Hidrológico de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas. Se diferencian valores umbral aplicables a todas las masas y algunos otros específicos de ciertas masas.

Asimismo, el Apéndice 1 de la memoria del Plan (disponible en la página web de la CMAOT), que contiene las fichas de caracterización adicional de cada masa de agua subterránea, incluye las normas de calidad y valores umbral aplicables a cada masa de agua subterránea en particular, pudiendo existir algún valor umbral adicional a los ya reseñados en la Orden.

Demarcación hidrográfica del Tinto-Odiel-Piedras.



Para esta demarcación no consta que la Orden de 23 de febrero de 2016, por la que se dispone la publicación de las determinaciones de contenido normativo del Plan Hidrológico del Tinto, Odiel y Piedras, incorpore valores umbral para sus masas de aguas subterráneas.

No obstante puede emplearse para este propósito el Apéndice 1 de la memoria del Plan (disponible en la página web de la CMAOT), que contiene las fichas de caracterización adicional de cada masa de agua subterránea, en las que se incluyen las normas de calidad empleadas en la evaluación de su estado químico.

Demarcación hidrográfica del Guadalete-Barbate.

Para esta demarcación no consta que la Orden de 23 de febrero de 2016, por la que se dispone la publicación de las determinaciones de contenido normativo del Plan Hidrológico del Guadalete-Barbate, incorpore valores umbral para sus masas de aguas subterráneas.

No obstante puede emplearse para este propósito el Apéndice 1 de la memoria del Plan (disponible en la página web de la CMAOT), que contiene las fichas de caracterización adicional de cada masa de agua subterránea, en las que se incluyen las normas de calidad empleadas en la evaluación de su estado químico.

Demarcación hidrográfica del Guadiana.

Los valores umbral de esta demarcación se definen actualmente en el Anexo VI Apéndice 4 del Real Decreto 1/2016.

Demarcación hidrográfica del Segura.

Los valores umbral de esta demarcación se definen actualmente en el Anexo X Apéndice 5 del Real Decreto 1/2016.

Se tendrán en cuenta aquellos valores de aplicación para todas las masas de aguas pertenecientes a la demarcación, como también los valores aplicables a la masa en concreto sobre la que se ubica el emplazamiento.

Entre las normas de calidad y valores umbral disponibles, se emplearán aquellos parámetros que guarden relación, directa o indirectamente, con las sustancias contaminantes posiblemente aportadas por las actividades antrópicas desarrolladas en el emplazamiento. En caso de superarse alguno de los citados valores, se considera que existen indicios de afección a las aguas subterráneas, a efectos del artículo 5



del R.D. 9/2005.

En el caso de encontrarse fase libre móvil de sustancias más o menos densas que el agua subterránea, de las recogidas en la lista I del Anexo III del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (Real Decreto 849/1986 y modificación por Real Decreto 606/2003), debe declararse la no conformidad de calidad de las aguas subterráneas y proceder a su retirada, de acuerdo con el art. 257.1 y 257.2 del Real Decreto 606/2003, por constituir esta fase libre un foco primario de introducción en las aguas subterráneas de contaminantes recogidos en dicha lista. Lo anteriormente expuesto es de aplicación salvo que el órgano competente en materia de aguas indique lo contrario con arreglo al art 257.3 de ese mismo RD 606/2003.

Si las aguas subterráneas asociadas al emplazamiento están destinadas a la producción de agua de consumo humano, y es de aplicación del R.D. 140/2003, deberá evaluarse la conformidad respecto a los criterios de calidad de consumo recogidos en su anexo I. Entre los Criterios de calidad del agua de consumo humano, se emplearán aquellos parámetros que guarden relación, directa o indirectamente, con las sustancias contaminantes posiblemente aportadas por las actividades antrópicas desarrolladas en el emplazamiento. En caso de superarse alguno de los citados valores, se considera que existen indicios de afección a las aguas subterráneas, a efectos del artículo 5 del R.D. 9/2005.

De no existir normativa de obligada aplicación en referencia a la calidad de las aguas subterráneas para los contaminantes estudiados y fuentes puntuales de contaminación, o alguna instrucción en este sentido por parte del órgano ambiental competente (como puede ser la definición de valores genéricos de no riesgo, intervención o similar), se evaluará la conformidad con los valores de normas o regulaciones de reconocido prestigio de aplicación en el sector, y en concreto con la Circular de remediación del suelo (2013 o en vigor), del Ministerio de Vivienda, Planificación del Territorio y Medio Ambiente de Holanda. Esta norma introduce dos valores de comparación: el valor objetivo y el valor de intervención.

La interpretación de estos valores según la normativa holandesa es el siguiente:

- El valor objetivo determina el nivel idóneo de concentración de la sustancia en el agua subterránea, por debajo de la cual puede afirmarse que no existen riesgos para la salud humana o los ecosistemas. Son valores propios de aguas naturales. Las aguas con concentraciones inferiores a éstas están exentas de afección.

Al tener en cuenta los ecosistemas, estos valores de no riesgo son valores muy bajos, propios de aguas naturales, más conservadores que los que se necesitarían como criterio de corte en un ACR para salud humana.



- El valor de intervención determina el nivel máximo a considerar en el agua subterránea, considerándose que por encima de él, existe un caso de seria contaminación, los riesgos existentes para la salud humana y los ecosistemas son inadmisibles y son necesarias actuaciones de remediación. La urgencia o no de estas actuaciones debe establecerse mediante la realización de un análisis de riesgos.

Este valor no debe ser entendido como el valor equivalente a un NGR para aguas subterráneas, puesto que es un indicador de grave contaminación, y como se verá más adelante, concentraciones inferiores a la misma también se consideran indicativas de afección y requieren la valoración de riesgos.

En su cálculo se emplea una metodología basada en el riesgo similar a la empleada en el cálculo de NGRs, pero entre otras diferencias, en la derivación de los valores de intervención se emplean parámetros medios de exposición en lugar de los percentiles superiores empleados para caracterizar al individuo razonablemente más expuesto, y un límite para el incremento de los riesgos cancerígenos de 10^{-4} en lugar de 10^{-5} , criterios diferentes y menos conservadores a los contemplados por el RD 9/2005.

- La circular holandesa también establece los niveles de seria contaminación, que son valores de intervención provisionales, que no pueden catalogarse como tales por varios motivos (ausencia de datos toxicológicos concluyentes, etc.). Si procede por la naturaleza de los contaminantes considerados, se emplearán igualmente dichos valores como si de valores de intervención se tratara, aclarando en el informe la provisionalidad de los mismos.
- Las muestras de aguas subterráneas con concentraciones comprendidas entre el valor objetivo y el valor de intervención/indicativo de seria contaminación, no presentan un nivel de afección inadmisible, aunque superan los valores para los que es posible afirmar que no existen riesgos, por lo que puede ser necesaria igualmente la realización de una evaluación de riesgos para analizar su situación.

En caso de no existir valores en el plan hidrológico de la demarcación hidrográfica para un parámetro analítico determinado, si se supera el valor objetivo de la normativa holandesa, se considerará que existen indicios de afección a las aguas subterráneas, a efectos del artículo 5 del R.D. 9/2005.

A la hora de aplicar el valor objetivo, se tendrá en cuenta no obstante que en algunos casos, tal como se indica en la propia circular holandesa, este valor es similar o incluso inferior a los límites de cuantificación de los laboratorios disponibles comercialmente, por lo que en ocasiones no es posible valorarlo con propiedad. Los valores analíticos inferiores a límites de cuantificación que sean superiores a los valores



objetivo, se considerarán indicativos de ausencia de afección, siempre y cuando se hayan empleado metodologías de ensayo propias para aguas naturales, y para un menor rango de concentración de entre las disponibles en el laboratorio contratado.

Para evaluar los parámetros agregados de la Circular holandesa, se tendrán en cuenta todos los isómeros contemplados por la normativa referenciada en la misma. Asimismo, en la evaluación de los hidrocarburos, se considerará el sumatorio de todos los presentes en las muestras analizadas, tanto las fracciones ligeras ($C<10$) como las pesadas ($C>10$), en función de la naturaleza del emplazamiento.

El informe evaluará la calidad de las aguas teniendo en cuenta el conjunto de valores de referencia adoptado, diferenciando si la superación se produce aguas arriba del emplazamiento (en caso de haber dispuesto piezómetro/s aguas arriba por haber previsto una posible afección de las aguas de entrada), y/o bajo el emplazamiento, y/o aguas abajo del emplazamiento.

De haberse muestreado en zonas de captación de agua para consumo humano próximas a la instalación, se valorarán (a título meramente informativo) los resultados obtenidos respecto a la normativa de comparación en aguas subterráneas como también con la aplicable a calidad de agua para su consumo, salvo que esté autorizado para otros usos (riego, abrevadero, etc.).

4.6.3 Evaluación de la conformidad sobre la calidad de las aguas superficiales

Con independencia de su uso en el consiguiente refinamiento del análisis de riesgos correspondiente, los resultados obtenidos en las aguas superficiales afectadas por la presencia de suelos contaminados serán valoradas respecto a las concentraciones obtenidas aguas arriba, como respecto a los límites normativos de calidad de aguas existentes.

Las normas de calidad ambiental aplicables serán las recogidas en el Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental, o la normativa que lo modifique.

En caso de que el resultado de alguno de los contaminantes estudiados superase los límites normativos de referencia, se declarará la no conformidad de la calidad ambiental de las aguas superficiales del emplazamiento o próximas al mismo, con dichos valores, diferenciando cuando esta superación se produzca aguas arriba de la zona de influencia del emplazamiento, y/o en la zona de influencia, y/o aguas abajo de dicha zona.

4.6.4 Evaluación de la calidad del aire y la fase gaseosa del suelo



Con independencia de su uso en el consiguiente refinamiento del análisis de riesgos correspondiente, las medidas de calidad del aire realizadas, serán comparadas con los valores límite normativos existentes en la materia.

Dichos valores son los valores objetivo y valores límite que sean de aplicación, de los recogidos en el Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, o normativa que lo modifique.

Por otro lado, en la normativa española de suelos no se contemplan NGRs específicos para la vía de inhalación de vapores en espacios interiores como sí la contempla p.ej. la metodología EPA. Además, las medidas de la fase gaseosa del suelo se llevarán normalmente a cabo en una fase de detalle de la investigación, en la que no tendría mucha utilidad el uso de estos NGRs conservadores, por lo que los resultados de estas medidas no se valorarán respecto a valores de referencia y simplemente se aportarán para su uso en el refinamiento del análisis de riesgos correspondiente.

En caso de realizar diferentes tipos de medidas de la fase gaseosa del suelo, por ejemplo bajo cimentación y en interior, o junto a cimentación a nivel de superficie y en profundidad, sí será de utilidad poner en comparación dichas medidas.

En líneas generales una intrusión de vapores quedará confirmada si las medidas bajo cimentación son más elevadas que las medidas en interior, y entre éstas, si las medidas en el sótano son mayores que las realizadas en la planta superior. También puede ser indicativa de intrusión, si la ratio entre las medidas bajo cimentación y las medidas en interior se mantienen en órdenes de magnitud parecidos para diferentes contaminantes con parámetros de volatilidad similares.

Si este orden es invertido o alterado, puede deberse bien a la existencia de fuentes de contaminación de fondo en el interior de la edificación, la contaminación del aire interior por el aire ambiente exterior, que no llevan consigo una intrusión de vapores desde el subsuelo, o bien a la existencia de vías preferenciales de entrada de vapores en la edificación (saneamientos, etc.) a partir del subsuelo.

5. CERTIFICACIÓN DE LA DESCONTAMINACIÓN DE SUELOS

Tras la remediación o descontaminación del subsuelo de un emplazamiento en el que se hayan identificado riesgos, bien sea por la vía de declaración de suelo contaminado o por vía voluntaria, se llevará a cabo una certificación de la calidad de los suelos y/o las aguas subterráneas descontaminadas o



remanentes, que verifique la consecución de los objetivos de la remediación aprobados por el órgano competente.

En aquellas situaciones en que los trabajos se realicen durante un tiempo suficientemente prolongado, bien por tratarse un gran volumen de suelos y/o aguas subterráneas a tratar, o bien porque la técnica de descontaminación aplicada tenga sus efectos mediante una evolución temporal, podrían ser necesarios informes de seguimiento de la descontaminación, realizando o no certificaciones parciales, adicionales a la certificación final.

En los trabajos de seguimiento se evaluará mediante la evolución de los parámetros críticos de cada proceso, la marcha de la remediación en ejecución. Se controlará a intervalos regulares la eficacia del proceso de depuración, comprobando p.ej. a la entrada y a la salida de la unidades móviles de tratamiento, las concentraciones en los gases y aguas evacuadas de los contaminantes para los que se han identificado riesgos en el emplazamiento, de manera que se pueda comprobar que la contaminación es realmente reducida y no transferida del subsuelo hacia otros medios. Estos muestreos son orientativos y pueden ser realizados al margen de acreditación UNE-EN ISO 17020 (salvo exigencia en sentido contrario del órgano competente en la materia), aunque deberán realizarse en condiciones normales de funcionamiento de la unidad y empleando preferentemente métodos normalizados.

5.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS INFORMES DE CERTIFICACIÓN

Los trabajos de certificación serán realizados por entidades colaboradoras en materia de calidad ambiental (ECCA) en el ámbito de suelos contaminados, tal y como se recoge en el artículo 31 del Decreto 18/2005.

Dichas empresas, emitirán informe con indicación expresa (conforme al documento CEA-ENAC-01) de la acreditación UNE-EN ISO/IEC 17020 de la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), evaluando la conformidad del emplazamiento estudiado respecto a la resolución administrativa que apruebe los trabajos de descontaminación y fije los valores objetivo a conseguir en el suelo remanente.

Las ECCA's desarrollarán su labor en los trabajos de certificación de suelos descontaminados respetando las pautas generales marcadas en este documento. No obstante, de acuerdo a su carácter de entidad colaboradora de la Administración, las ECCA's serán responsables de aplicar los criterios adicionales que sean necesarios sobre los mínimos marcados en este documento, para realizar un correcto y completo diagnóstico de la eficacia de la descontaminación realizada en los emplazamientos investigados. Se



tendrá presente la relevancia que adquiere la validez del juicio emitido en este tipo de estudios, sobre la protección de la salud de la población en el escenario posterior a la descontaminación del suelo.

Con la certificación se persigue evaluar, la eficacia de la descontaminación de suelos realizada en un emplazamiento. Para ello, se ha de confirmar el cumplimiento de los valores objetivo de descontaminación marcados en el volumen de suelos identificados como contaminados en las etapas previas de caracterización y de análisis de riesgos, o bien, en el caso de una excavación y retirada a vertedero, que esos valores objetivo se alcanzan en los suelos remanentes tras la retirada del material.

5.2 PLAN DE MUESTREO DE SUELOS

El plan de muestreo que la entidad colaboradora en materia de calidad ambiental defina para la investigación de cada emplazamiento deberá tener en cuenta las indicaciones que se citan a continuación. Este plan de muestreo puede llevarse a cabo en una sola campaña, o bien, como ya se ha citado previamente, realizarse en sucesivas fases.

5.2.1 Selección de los puntos de muestreo

A la hora de seleccionar los puntos de muestreo más adecuados, deberá distinguirse si se ha realizado un tratamiento de recuperación “in situ” al terreno, o se ha procedido a una excavación del material contaminado y evacuación a vertedero o a centro de tratamiento, o bien es tratado “ex situ” en el emplazamiento.

5.2.1.1 Puntos de muestreo para la certificación de huecos de excavación

Para la certificación de huecos de excavación, se dispondrá sobre la superficie del fondo del vaso un número de puntos de muestreo debidamente justificado, pudiendo tomar como referencia las siguientes reglas extraídas de la “Guía de excavaciones selectivas en el ámbito de los suelos contaminados” de IHOBE-Gobierno Vasco:

Tabla 11: Densidad de muestreo en certificación de fondos de huecos de excavación

Superficie (m²)	Número mínimo de PDMs en fondo de excavación
? 50	1
51-100	2
101-150	3
151-250	4
251-400	5
401-600	6
601-800	7
801-1000	8



>1000	8 + 1 PDM POR CADA 300 m ²
-------	---------------------------------------

El número de puntos de muestreo que corresponda al tamaño del vaso se dispondrá sobre su superficie siguiendo una malla de muestreo, que sin pretender que sea rígida, se asemejará a una red de muestreo sistemática o regular, de tipo cuadrada o triangular, con un espaciado entre puntos próximos más o menos constante.

Cualquier área identificada como contaminada, por pequeña que fuera, deberá quedar representada al menos por un punto muestral en su superficie.

Se dispondrán también puntos muestrales en las paredes del hueco de excavación si estas poseen una altura superior a 30 cm, distribuidos cada cierta distancia a lo largo del perímetro, de acuerdo con el siguiente criterio:

Tabla 12: Densidad de muestreo en certificación de paredes de huecos de excavación

Longitud pared excavación (m)	Número mínimo de PDMs en pared de excavación
? 5	1
5-10	2
10-20	3
21-30	4
31-60	5
61-90	6
91-150	7
>150	8

Alternativamente, se podrá proponer otras densidades de muestreo tanto para fondo como para paredes de excavación, que estén debidamente justificadas y extraídas de documentos técnicos de reconocido prestigio (normas UNE, ISO, EPA, ASTM, etc.), que se adoptarían en su caso igualmente como documentos reconocidos.

Respetando en líneas generales las reglas mínimas indicadas anteriormente, los puntos de muestreo de los huecos y paredes de excavación se situarán sobre todas aquellas zonas en las que se aprecien indicios de una posible afección remanente. Para ello, el muestreo del estudio de certificación se deberá realizar justo a continuación de la excavación de los materiales contaminados, y con carácter previo al relleno del hueco de excavación.

Sin perjuicio de otras obligaciones que se puedan establecer en futuros desarrollos normativos, el material empleado en el relleno del hueco de excavación deberá disponer de algún tipo de documentación que garantice su procedencia de lugares no contaminados o potencialmente contaminados. Caso de no disponer de dicha documentación o de que ésta no sea concluyente, o de emplearse terrenos o apilamientos del propio emplazamiento, la entidad colaboradora en materia de calidad ambiental realizará un muestreo de los mismos, empleando para ello métodos preferentemente normalizados (p.ej. ISO 10381-8:2006) que también deberán estar incluidos en su alcance de acreditación.

Las áreas empleadas para el acopio temporal de los materiales excavados, con independencia de su necesaria impermeabilización con geomembranas, también deberán ser contempladas en la certificación, salvo que estén hormigonadas y posean un red de recogida de las escorrentías y lixiviados, o se empleen para este fin superficies incluidas en el perímetro de los suelos contaminados que vayan a ser igualmente excavadas con posterioridad. Se tomarán para ello muestras superficiales (0-30 cm aprox.) a partir del nivel del terreno sobre el que se apoyen los acopios, con una densidad de muestreo igual a la empleada en la etapa de caracterización exploratoria para zonas sin indicios de afección o riesgo mínimo de contaminación.

En caso de detectarse la superación de los valores objetivo de descontaminación en estas áreas, pasarán a tratarse como una zona con riesgo de contaminación de origen difuso y se realizará sobre ellas una investigación de detalle.

5.2.1.2 Puntos de muestreo para la certificación en tratamientos “in situ” del terreno

Para la certificación de suelos recuperados mediante alguna técnica de tratamiento “in situ”, se dispondrá sobre la superficie identificada como contaminada una malla de muestreo cuya densidad dependerá de las vías de exposición identificadas como no seguras en el análisis de riesgos:

- Cuando los riesgos sean por contacto directo, inhalación de partículas o ingestión de alimento contaminado, se empleará una malla de muestreo en función de la superficie contaminada siguiendo el mismo criterio que el empleado para una investigación detallada.
- Cuando los riesgos sean por inhalación de vapores o por lixiviación hacia las aguas subterráneas a partir del suelo, se llevará a cabo una malla de muestreo de suelos en función de la superficie contaminada siguiendo el mismo criterio que el empleado en una investigación detallada, o bien alternativamente, la densidad propia de una investigación exploratoria apoyada con la medida de la fase gaseosa del suelo en el primer caso, o de las aguas subterráneas en el segundo.



5.2.1.3 Muestreo para la certificación de tratamientos “ex situ” del terreno

Si la descontaminación realizada ha consistido en la excavación, tratamiento del suelo en la superficie del propio emplazamiento, bien mediante métodos biológicos (biopilas, landfarming, etc.) o mediante una planta móvil de descontaminación, y posterior vertido del terreno recuperado sobre los huecos de excavación, se llevará a cabo un estudio de certificación combinado, que por una parte comprobará el estado de los suelos remanentes en el fondo del hueco de excavación, y por otra determinará la calidad del producto final del tratamiento “ex situ” que posteriormente es vertido en los huecos de excavación.

Para certificar la calidad de los suelos remanentes en los huecos de excavación se seguirán las instrucciones comentadas en los apartados inmediatamente anteriores en cuanto a la selección de puntos de muestreo y profundidades de muestreo en huecos de excavación, incluyendo el muestreo de las paredes o frentes de excavación.

Para certificar la calidad de los suelos obtenidos tras el tratamiento “ex situ”, se llevará a cabo un muestreo del producto final obtenido proporcional al volumen de suelo tratado. Se tomará al menos una muestra por cada 80 m³ tratados, bien de forma periódica a la salida de la planta de tratamiento conforme el suelo es tratado, bien estableciendo las celdas de muestreo necesarias sobre el volumen de suelos descontaminado por ej. por vía biológica una vez finalizado el tratamiento. Si las sustancias a descontaminar permiten su medida cualitativa o semicuantitativa mediante el empleo de equipos in situ, se llevará a cabo adicionalmente un control de la descontaminación con mayor cadencia a través de dichas medidas in situ, cada 15 m³ aproximadamente.

Estos muestreos se llevarán a cabo normalmente en apilamientos sobre superficie, cintas transportadoras, etc, apartándose de la metodología específica de muestreo de suelos contaminados mediante perforación del terreno. Se seguirán preferentemente métodos normalizados para estas tomas de muestra, como los indicados en las normas ISO 103818:2006 y UNE CEN/TR 15310-2:2008 o posteriores ediciones en vigor.

También se realizará un muestreo de las áreas ocupadas por las plantas móviles de tratamiento o por el tratamiento biológico, con independencia estas últimas de la necesaria impermeabilización, salvo que se dispongan sobre superficie hormigonada con recogida de drenajes y escorrentías, o sobre suelos contaminados igualmente tratados con posterioridad. Se tomarán para ello muestras superficiales (0-30 cm aprox) a partir del nivel del terreno sobre el que se apoyen, con una densidad de muestreo igual a la empleada en la etapa de caracterización exploratoria para zonas sin indicios de afección o riesgo mínimo de contaminación.



En caso de detectarse la superación de los valores objetivo de descontaminación en estas áreas, pasarán a tratarse como una zona con riesgo de contaminación de origen difuso y se realizará sobre ellas una investigación de detalle.

5.2.2 Selección de las profundidades de muestreo

5.2.2.1 Profundidades de muestreo para la certificación de huecos de excavación

Si la descontaminación realizada ha consistido en la excavación y evacuación de los terrenos contaminados en cada punto de muestreo seleccionado en el fondo del vaso de excavación se deberá tomar una muestra superficial (en el intervalo 0-30 cm aprox.) a partir del nivel de base de la excavación.

En los puntos muestrales adicionales de las paredes del hueco de excavación se tomará una muestra a media altura en el tramo de profundidad donde se detectó previamente la contaminación, o a una profundidad diferente si se aprecia por ensayos in situ, visual u organolépticamente que puede existir contaminación remanente a ese nivel.

Para frentes de excavación superiores a los 2 m de altura, se tomarán dos muestras en cada perfil, dividiendo su altura en dos tramos iguales, y situando el punto de muestreo en el punto medio de cada tramo, o a una profundidad diferente si se aprecia por ensayos in situ, visual u organolépticamente que puede existir contaminación remanente a ese nivel dentro del tramo correspondiente.

En caso de existir frentes de excavación escalonados, por ejemplo al ampliar la profundidad de excavación en determinadas zonas tras los primeros resultados de la certificación, cada uno de estos taludes se estudiará de forma individualizada conforme a los criterios ya comentados.

5.2.2.2 Profundidades de muestreo para la certificación de tratamientos “in situ” del terreno

Si la descontaminación ha consistido en un tratamiento “in situ” del terreno se tomarán muestras cada metro, con un mínimo de una muestra en cada perfil si se dispone de medidas in situ apropiadas, en el tramo de profundidad en el que se estima estén localizados los suelos contaminados, de acuerdo con las muestras tomadas y los resultados analíticos obtenidos en cada zona en la etapa de caracterización, y los niveles objetivos de descontaminación marcados.

5.2.3 Muestras simples y muestras compuestas

En este tipo de estudios no se tomarán normalmente muestras mixtas o compuestas, por las mismas dificultades ya expresadas para la realización de este tipo de muestras y porque también en la fase de



remediación interesa conocer si espacialmente o en el tiempo de funcionamiento de una unidad móvil, el grado de reducción de contaminantes es el requerido o existen anomalías puntuales.

Se exceptúan las muestras mixtas que puedan obtenerse en base a la mezcla de varios incrementos provenientes p.ej. de un determinado lote de material tratado en la planta móvil, un mismo apilamiento de material de préstamo para el relleno de excavación, etc., siempre y cuando se respeten, y así pueda hacerse por la naturaleza de los parámetros a controlar, las recomendaciones efectuadas para las muestras compuestas en el apartado de la investigación exploratoria de este informe.

Por esta razón, p.ej, no será apropiado la composición de muestras para certificar tratamientos biológicos o por desorción térmica de la contaminación, debido a la volatilidad de los componentes asociados a las sustancias normalmente saneadas mediante estos sistemas de tratamiento, que impediría una necesaria homogenización y mezcla de las submuestras (a menos que se haga en laboratorio sobre extractos).

La composición de las muestras, de acuerdo a ISO 10381-8, debería realizarse en laboratorio en cualquier caso para permitir que cada submuestra participa con igual peso en la compuesta, pudiéndose llevar a cabo no obstante la subdivisión de las diferentes submuestras en campo, con una primera o grosera reducción del tamaño de grano, si el volumen de las mismas es excesivo para su transporte al laboratorio.

5.3 PLAN DE MUESTREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES

Caso de detectarse durante los trabajos de caracterización la presencia de contaminantes en fase libre sobre el nivel freático (LNAPL), o en una zona deprimida de la base del acuífero o de un nivel intermedio impermeable (DNAPL), su extracción y tratamiento y/o evacuación deberá haber sido contemplada en el plan de trabajos de descontaminación.

En el estudio de certificación se deberá comprobar la presencia o ausencia de fase libre mediante sonda interfase en los piezómetros que se comprobaron afectados durante la caracterización.

Para el seguimiento y la evaluación del efecto de la descontaminación de los suelos y de cualquier otra actuación de remediación de la contaminación hídrica acordada sobre la calidad de las aguas subterráneas y superficiales afectadas, se seguirán las directrices que establezca el órgano ambiental competente.

En ausencia de tales directrices se muestrearán todos los piezómetros en los que los niveles de



contaminantes detectados durante la caracterización dieran lugar a un riesgo inadmisibles. Se muestrearán además piezómetros en los que interese comprobar la eficacia de la descontaminación llevada a cabo.

5.4 PLAN DE MUESTREO DEL AIRE INTERSTICIAL DEL SUELO

Caso de emplearse medidas de la calidad del aire intersticial como apoyo al muestreo de suelos para certificar la descontaminación “in situ” realizada, se llevará a cabo un muestreo en todos aquellos pozos/sondas de vapor donde previamente se hayan detectado concentraciones en aire originarias de riesgo.

En caso de no disponerse de ellas previamente, se construirán con arreglo a las recomendaciones establecidas en este documento para las investigaciones de detalle, disponiendo en todo caso PDMs en todas aquellas zonas del emplazamiento donde se hayan detectado situaciones de riesgo por inhalación a partir de las concentraciones detectadas en los suelos y/o las aguas subterráneas.

5.5 ENSAYOS ANALÍTICOS A REALIZAR EN LA CERTIFICACIÓN

Los ensayos analíticos a realizar sobre las muestras obtenidas en el estudio de certificación serán aquellos para los que se hayan establecido valores objetivo de descontaminación.

Cada parámetro se analizará en todas aquellas zonas identificadas como contaminadas, que incluyan algún punto de muestreo de la etapa de caracterización en el que se hubieran detectado concentraciones superiores a los valores objetivo de descontaminación.

La calidad de los ensayos a realizar y el uso posterior de su incertidumbre en la valoración de los resultados serán los mismos que los requeridos en los estudios de caracterización.

5.6 PERÍODO PARA REALIZAR LA CERTIFICACIÓN

La certificación de los huecos de excavación se llevará a cabo tan pronto sea posible tras la retirada del material.

La certificación de los suelos descontaminados “ex situ” en planta móvil se llevará a cabo de forma progresiva conforme sean tratados en la instalación y de forma previa a su reubicación en el hueco de excavación.



En el caso de otros tratamientos “ex situ” como los biológicos, se certificará la calidad de los suelos una vez haya concluido el proceso de remediación en base a los resultados de la monitorización, e igualmente de forma previa a su reutilización en el emplazamiento.

La certificación de la retirada de fase libre y los tratamientos “in situ” necesitan sin embargo un plazo temporal más amplio, suficiente para que el subsuelo recupere sus condiciones ambientales naturales y se pueda constatar que no existen recidivas o aumentos de las concentraciones tras la desaparición del efecto de los agentes empleados en la remediación (oxígeno, surfactantes, vacío, etc.).

La certificación debería comenzar en estos casos al menos un mes tras la finalización de los tratamientos, y una vez que se constate que las condiciones ambientales son estables y representativas del medio, y si se apoya en medidas de la calidad del aire intersticial o las aguas subterráneas, deberían éstas monitorizarse durante un cierto tiempo, de manera que sean representativas de las diferentes condiciones ambientales existentes y abarque p.e. un ciclo estacional completo (época de niveles piezométricos elevados y bajos, existencia de bombeos, etc.).

5.7 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA CERTIFICACIÓN

Los resultados analíticos de la certificación serán contrastados con los valores objetivo de descontaminación que se establezcan para cada emplazamiento concreto en la correspondiente resolución administrativa de aprobación del plan de trabajos de descontaminación.

En caso de que el resultado de alguno de los contaminantes estudiados superase estos valores objetivo, se declarará la no conformidad de la calidad ambiental de los suelos del emplazamiento respecto a esos objetivos en la zona de muestreo correspondiente.

En el caso de huecos de excavación, la actuación lógica sería ampliar horizontal o verticalmente la excavación en torno a dichos puntos, y volver a repetir el muestreo y la valoración de resultados. Esta sistemática puede llevarse a cabo de forma iterativa durante las labores propias de excavación, mediante la presencia de la entidad colaboradora en materia de calidad ambiental (ECCA) en dichas labores, y el empleo, por ejemplo de ensayos “in situ”, siempre y cuando la última muestra tomada, que sirve de referencia para delimitar el suelo conforme, se analice en laboratorio acreditado.

En el informe final de la certificación, no obstante, se indicarán todas las muestras tomadas, sea cual fuere su valoración, georreferenciadas de forma precisa y contextualizadas respecto a la geometría del hueco de excavación en el momento de su toma (si pertenecen a fondo o pared, profundidad dentro del



perfil, etc.); y en caso de valoraciones negativas, las actuaciones posteriores de excavación llevadas a cabo en dichos puntos y las muestras finales que delimitan la conformidad con los objetivos de la descontaminación.

Si la no conformidad se detectara en materiales obtenidos a la salida de una planta móvil de tratamiento, el suelo tratado desde la última muestra conforme obtenida, no podrá ser devuelto al hueco de excavación, dándole el tratamiento (ampliación del muestreo de la tongada, recirculación hacia el proceso de tratamiento, etc.) que al efecto se prevea en el correspondiente plan de trabajos de descontaminación. Las muestras no conformes obtenidas en estos casos también deberán ser incluidas en el informe final de certificación, con indicación de las actuaciones llevadas a cabo sobre la tongada de suelo identificada como no conforme. A este respecto, la empresa encargada de llevar a cabo la descontaminación, deberá segregar e identificar adecuadamente las diferentes tongadas de material tratado hasta la evaluación de su conformidad, de acuerdo con los requerimientos que a tal efecto establezca la resolución administrativa.

Si la no conformidad se detectara en materiales tratados in situ o ex situ, se proseguirá el tratamiento hasta la consecución de los valores objetivo.

Cuando se controle la calidad de las aguas subterráneas o del aire intersticial del suelo como medida de apoyo al muestreo de suelos para certificar la descontaminación “in situ” realizada, se contrastarán las concentraciones obtenidas con las concentraciones modeladas para dichos medios en el análisis de riesgos, partiendo de concentraciones en suelos iguales a los valores objetivo establecidos.

6. MÉTODOS DE PERFORACIÓN

Para el muestreo tanto en los estudios de caracterización como de certificación se emplearán métodos de perforación y extracción que alteren en la menor medida posible las muestras a tomar. Se seguirán procedimientos de perforación compatibles con el posterior muestreo medioambiental de los recogidos en normas y documentos técnicos de referencia (p.ej. UNE-ISO 10381-2).

Los métodos empleados habitualmente son los sondeos manuales, los sondeos semimecánicos o ligeros, calicatas y sondeos mecánicos.

Los métodos de perforación serán seleccionados en cada emplazamiento según sus características litológicas, hidrogeológicas y de distribución de la contaminación. Se seguirán no obstante una serie de



criterios generales:

- Todos los puntos de muestreo (PDMs) se perforarán hasta un nivel de profundidad suficientemente inferior al de los posibles focos de contaminación presentes, y en terreno natural en el que dejen de existir evidencias analíticas, visuales u organolépticas de posible afección.
- A menos que esté descartada la presencia de aguas subterráneas mediante estudios previos similares llevados a cabo en el emplazamiento, o que la profundidad de las mismas sea suficientemente significativa para descartar técnicamente su posible afección, en la etapa de caracterización se realizarán un mínimo de sondeos mecánicos distribuidos por las diferentes zonas del emplazamiento, con objeto de determinar la presencia o ausencia de estas aguas.
- De confirmarse la presencia de aguas subterráneas, y la posible afección de las mismas por la presencia de contaminantes en los suelos, se llevará a cabo mediante sondeo mecánico, la red de puntos de muestreo prevista en el apartado “Plan de muestreo de aguas subterráneas” para los estudios de caracterización de este documento. Estos sondeos profundizarán hasta que las columnas no presenten evidencias visuales u organolépticas de afección, y al menos, hasta un par de metros por debajo del nivel freático, siendo posteriormente acondicionados como piezómetros.
- El resto de PDMs contemplados en el plan en los que no se vaya a realizar un control de la calidad de las aguas subterráneas, deberá no obstante perforarse hasta encontrar el nivel piezométrico, si por la naturaleza de los contaminantes presentes (p.ej. hidrocarburos del petróleo) es factible que el suelo de la zona no saturada haya sido afectado en el nivel de oscilación de dicho nivel freático, a partir de contaminación que haya sido posiblemente transportada por las aguas subterráneas desde focos de contaminación ubicados en otros lugares de la instalación.
- El método de perforación elegido en tales casos deberá permitir obtener muestras de suelo de ese nivel de profundidad con la precisión suficiente, y sin riesgo de mezcla con niveles superiores, necesitándose normalmente en estos casos el sondeo mecánico.
- Si en el emplazamiento hubiera presencia significativa de contaminantes más densos que el agua (por ejemplo compuestos organoclorados), y la base impermeable del acuífero se encontrara a una profundidad no excesiva, se continuará la perforación hasta dicha base o se dispondrá otra perforación paralela que llegue hasta esa profundidad, disponiendo un piezómetro adecuado para el control de la calidad del agua a ese nivel y la detección de una posible fase libre en la base del acuífero (fases líquidas más densas que el agua –DNAPL-).
- Los sondeos manuales y semimecánicos o ligeros se restringirán a la caracterización de afecciones muy superficiales de la calidad del suelo, con ausencia de aguas subterráneas o elevada profundidad de las mismas. También se podrán emplear en el muestreo para la certificación del fondo de huecos de excavación, donde las muestras a tomar son superficiales.



- Las catas podrán emplearse por sí solas en afecciones superficiales del suelo como las comentadas anteriormente, y también en otros casos en combinación con sondeos mecánicos realizados en el mismo área, cuando por la testificación realizada en éstos, se haya descartado la presencia de contaminación a profundidades mayores a las de la base de las catas que, según las condiciones de seguridad que ofrezca el terreno, se puedan realizar. No se emplearán catas en terrenos (por ejemplo arenas), o a profundidades (por cercanía al freático) que impliquen caídas significativas de materiales de las paredes hacia el fondo de la cata.

Los sondeos mecánicos se realizarán siempre que sea posible por rotación con corona de widia y extracción de testigo en continuo mediante golpeo de la batería de perforación.

La perforación se realizará en seco, sin emplear fluidos de perforación, en todo caso agua de calidad potable en las cantidades mínimas necesarias y cuando ello sea absolutamente imprescindible para el avance de la perforación. Se tendrá especial cuidado a este respecto en tramos del sondeo en los que la litología esté constituida por una mezcla de materiales de diferente granulometría y sin cohesión, pues el uso de agua arrastrará los finos, que es la fracción donde preferentemente se fijarán los contaminantes. Si fuera inevitable el uso de alguna cantidad de agua, se advertirá claramente en el informe de inspección, motivando su empleo e indicando los volúmenes aproximados empleados en cada sondeo y los tramos del testigo que pudieran haber quedado afectados.

No se considerará justificado el uso de agua en la perforación si la misma puede ser realizada en seco acortando en pequeños intervalos de longitud el avance de la perforación, o si la perforación pudiera avanzar por golpeo de la batería de perforación.

Si estará justificado en ciertos casos el empleo de agua, igualmente de calidad potable, para extraer testigos muy cohesivos (p.ej. arcillas compactas) de la batería de perforación, siempre que ello no sea posible mediante golpeo y acortando la profundidad de las maniobras. Se cuidará que el agua sólo contacte con el tapón superior del testigo, para lo cual la extracción de mismo de la batería se realizará lentamente y cortándolo en trozos de escasa longitud que se trasladarán con prontitud a la caja portatestigos. Se evitará siempre que sea posible la toma de muestras en el tramo superior impactado por el agua.

Las perforaciones tendrán normalmente como único objetivo el muestreo medioambiental. La posible compatibilización de la perforación realizada con otros objetivos, por ejemplo un estudio geotécnico, no comprometerá en ningún caso la idoneidad de la perforación realizada ni las muestras tomadas para el análisis químico tanto de suelos como de aguas subterráneas. Así por ejemplo, no será posible realizar



ensayos de permeabilidad “in situ” o ensayos geotécnicos “in situ”, que impliquen una compresión del terreno o cualquier otra alteración mecánica o química en el intervalo de profundidad en el que sea procedente el muestreo ambiental.

Se llevará a cabo un adecuado seguimiento de la labor realizada por los sondistas, que asegure que la operación se realiza con criterios adecuados a una investigación medioambiental.

Así por ejemplo, se cuidará de la limpieza en general con la que se realizan las diferentes operaciones. Las baterías de perforación, cazos de excavadora, barrenas, etc., serán limpiadas externa e internamente con agua a presión entre punto y punto de muestreo, y entre diferentes maniobras de un mismo sondeo cuando se atravesasen tramos contaminados que pudieran introducir contaminación por arrastre en las profundidades inferiores (por ejemplo, presencia de hidrocarburos, lodos contaminados de naturaleza cohesiva, etc.).

Las espuelas empleadas para la recogida del testigo, serán limpiadas con agua a presión entre maniobra y maniobra, y serán trasladados a las cajas portatestigos usando guantes desechables de látex, nitrilo o similar, no con los guantes de protección mecánica empleados en el manejo del sondeo.

Se evitará en la medida de lo posible el empleo de grasas lubricantes de roscas y similares, limitándose a las cantidades imprescindibles y limpiando cualquier exceso con papel absorbente. Se empleará en todo caso grasas biodegradables, grasa de silicona, polvo de grafito, etc, que no introduzcan los contaminantes, metálicos u orgánicos, que se pretendan caracterizar en cada caso.

Las herramientas de perforación no deben presentar restos de óxidos o corrosiones, ni estar recubiertas durante su utilización por grasas, pintura, etc., que puedan desgastarse o desprenderse durante la perforación, contaminando el testigo (por ejemplo en coronas de perforación nuevas).

Se evitará el llenado del depósito de combustible de la máquina de sondeos, con el riesgo de derrame que ello conlleva, durante la realización de una perforación. Se empleará para ello los desplazamientos entre punto y punto de toma de muestra. Asimismo se cuidará que la máquina no sufra fugas de aceite hidráulico por alguno de sus circuitos, que pudieran alcanzar el suelo y producir contaminación cruzada en los suelos y/o las aguas subterráneas a muestrear.

Las cajas portatestigos serán siempre nuevas, y nunca se ubicarán en la dirección de la salida de gases de escape de la máquina de sondeos. Se taparán siempre que no se estén llenando o utilizando para realizar la testificación de la columna.



Durante la realización del sondeo, mecánico o manual, se cuidará que no existan desprendimientos de las paredes de la parte ya perforada hacia el fondo del mismo, que pudieran desvirtuar las muestras tomadas por la batería sacatestigo, exceptuando aquellos que inevitablemente se producen en pequeñas magnitudes y que son evitados desechando el tramo final de testigo extraído en cada maniobra.

En sondeos manuales y semimecánicos este hecho es frecuente, por lo que se aconseja llevar un control de la profundidad del fondo de la perforación, pues suelen rellenarse parcialmente de materiales caídos entre sucesivas maniobras, y realizar en su caso maniobras intermedias de limpieza.

En el caso de los sondeos mecánicos, estos desprendimientos pueden evitarse mediante la entubación del sondeo a medida que éste se realiza. El revestimiento puede ser igualmente necesario cuando se atraviesen niveles contaminados que puedan introducir contaminación hacia el interior del sondeo (por ejemplo, saturación en hidrocarburos).

Durante el muestreo de suelos con posible presencia de compuestos orgánicos volátiles (COV's), se cuidará de evitar el calentamiento y la aireación de las muestras. Así por ejemplo, cuando el muestreo se realice mediante sondeo, se evitará en lo posible el calentamiento del testigo. Las muestras con compuestos orgánicos volátiles, se tomarán en sus recipientes y se refrigerarán justo después de que el testigo sea depositado en la caja portatestigos, con independencia de que su selección y envío a laboratorio dependa del conjunto de medidas in situ y de la testificación de la columna del testigo realizadas durante la ejecución de todo el sondeo. Para ello, cuando el testigo sea extraído y se observen rápidamente en él evidencias visuales y/o organolépticas de posible afección, se llevará a cabo la toma de la muestra de suelo para laboratorio junto con la muestra, si procede, para medida in situ. Caso de emplear medidas in situ como apoyo al muestreo, en función de los resultados de las mismas se seleccionará al finalizar el sondeo la/s muestra/s entre las recogidas que finalmente será enviada a laboratorio, desechando el resto.

En la realización de catas, siempre que sea posible desde un punto de vista de la seguridad y hasta una cierta profundidad límite según normativa vigente, las muestras se tomarán preferentemente de las paredes de la misma, y en su defecto de los materiales excavados y retirados a intervalos pequeños de profundidad (30-50 cm aprox.), de forma que las muestras tomadas estén lo menos alteradas posible, y su profundidad dentro del perfil pueda ser determinada con cierta precisión y fiabilidad. En el caso de las muestras para la determinación de compuestos orgánicos volátiles, si no pueden ser tomadas de las paredes y se ha de hacer sobre el material extraído, se tomarán preferentemente directamente del cazo, previamente a su vertido al terreno.



Los materiales excavados se dispondrán, segregados en diferentes montones según el intervalo de profundidad del que proceden, lejos del borde de la cata, de forma que se evite la caída de material ya retirado sobre las paredes a muestrear. Una vez realizadas la testificación de la cata y la toma de muestras, se procederá al llenado de la cata disponiendo las diferentes paladas de materiales anteriormente excavados en un nivel de profundidad similar al que fueron retirados, o alternativamente, rellenando la cata con material de préstamo y gestionando como residuo el material excavado de acuerdo con su naturaleza.

Todos los puntos de muestreo adoptados serán debidamente georreferenciados con ayuda de GPS, a menos que existan elementos constructivos o similares próximos, localizables por fotografía aérea, que permitan una localización más precisa mediante la medida de las correspondientes distancias. En el caso de utilizarse coordenadas UTM deberán estar referidas al huso 30 y en el sistema de referencia geodésico global ETRS89. Si se instalan piezómetros, las medidas de georreferenciación, en especial de la coordenada Z en altura, deben ser lo más ajustadas posibles, por lo que se requerirá normalmente el empleo de equipos de topografía de precisión.

Se registrarán los detalles de la perforación realizada (fechas de realización, corona, diámetro, profundidad de las diferentes maniobras, uso de revestimiento, uso de agua, etc.), las litologías atravesadas y los resultados de las medidas “in situ” realizadas a las diferentes profundidades. En el informe se reflejará esta información mediante los correspondientes partes de sondeo, de cata o similares.

7. INSTALACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE PIEZÓMETROS

El diseño y la instalación de puntos de control de aguas subterráneas es imprescindible para asegurar unas medidas representativas de la calidad de las mismas.

Los piezómetros que sea necesario habilitar se instalarán y acondicionarán siguiendo preferentemente métodos normalizados y de entidades de reconocido prestigio (como ISO 5667-22:2010 Water quality – Sampling – Part 22: Guidance on the design and installation of groundwater monitoring points, ASTM D5092-04, ASTM D5521M-13, EPA-ERT SOP 2048).

7.1 CRITERIOS DE DISEÑO DEL PIEZÓMETRO



En líneas generales, se tendrán en cuenta al menos las siguientes características constructivas:

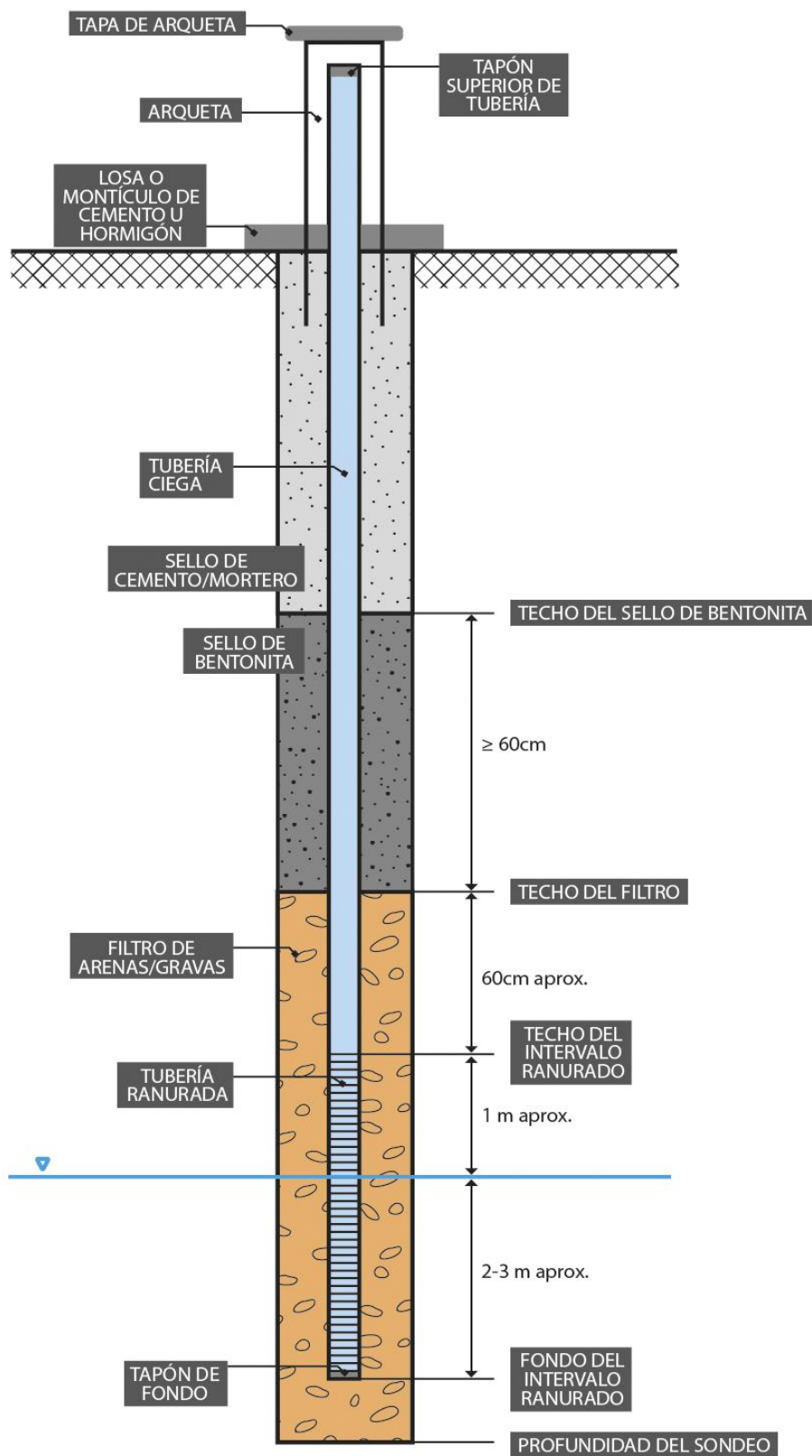
- Los materiales de la tubería piezométrica deberán ser los más resistentes químicamente en función de las características de las aguas subterráneas del emplazamiento y los contaminantes presentes en ellas, empleándose normalmente tubería de PVC-U. Si se conoce o se prevé la existencia de fase libre se recomiendan no obstante materiales como HDPE y PTFE/FEP. En caso de emplearse metálicas, tendrán que ser de acero inoxidable. Las conexiones entre segmentos de la tubería no deberán realizarse de forma que se puedan introducir agentes químicos que contaminen las muestras tales como adhesivos o soldaduras, sino que serán roscadas, y sin resaltos tanto interior como exteriormente.
- La tubería irá equipada con tapón de fondo que evite la entrada de finos por el extremo inferior y facilite el flujo horizontal.
- Las tuberías se dispondrán con un ranurado de fábrica de un ancho inferior al tipo de grava a emplear en el anular, en el tramo de profundidad esperado para la oscilación del nivel piezométrico o el intervalo de profundidad en la zona saturada que se desee muestrear, con un máximo normalmente de 3 m de longitud salvo circunstancias excepcionales técnicamente justificadas.
 - ✓ Cuando el ranurado del piezómetro persiga el muestreo de las aguas subterráneas más superficiales, por ejemplo cuando el foco de contaminación es superficial o se ubica en zona no saturada, el ranurado debería extenderse al menos un metro por encima del nivel piezométrico (con objeto de abarcar su posible oscilación) y entre dos y tres metros por debajo de él como máximo (con objeto de evitar dilución de la posible pluma contaminante con aguas profundas no afectadas).
 - ✓ Cuando el posible foco de la contaminación se ubique en la zona saturada, el intervalo ranurado se extenderá o se desplazará si es necesario en profundidad para abarcar el intervalo de la zona afectada.
 - ✓ Cuando interese conocer la calidad de las aguas subterráneas a un nivel de profundidad determinado del acuífero, por ejemplo para acotar la profundidad de la pluma contaminante en una investigación detallada, el intervalo ranurado se dispondrá específicamente en el nivel de profundidad de interés.
 - ✓ Si se persigue caracterizar la afección a un nivel acuífero inferior, normalmente separado del superficial por algún material impermeable confinante, el intervalo ranurado se dispondrá específicamente en los primeros metros de dicho nivel.
 - ✓ Cuando el ranurado del piezómetro persiga la detección de una posible fase libre densa (DNAPL) acumulada en la base del acuífero o en algún nivel impermeable intermedio, el tapón de fondo y la parte ciega del último tramo de tubería ranurada debería quedar dentro del nivel impermeable inferior, restando esta longitud en las medidas aparentes del espesor de la fase libre.



- En torno a la tubería, en el espacio anular con la pared de la perforación, se instalará filtro de grava silícea calibrada de diámetro de partícula (2-4 mm generalmente) y de espesor adecuado, para evitar la entrada de finos en torno al tramo ranurado de tubería. Cuando la litología predominante sean limos y arcillas, se recomiendan filtros de arena con diámetros inferiores. Este filtro de grava/arena debe sobrepasar el techo del ranurado y solaparse con el primer tramo ciego de tubería en aproximadamente 60-90 cm, para evitar interferencias por la bentonita y el cemento empleados.
- Sobre el filtro de grava y en torno al tramo superior ciego del piezómetro, se instalará sello de bentonita y en los últimos centímetros tapón de cemento, que evite la percolación hacia el anular interior de aguas superficiales de escorrentía y asegure el cierre del piezómetro.
- El acabado final (tapas de cierre, arqueta, etc.) debe garantizar su aislamiento y una capacidad de carga suficiente para garantizar su integridad.



Figura 8: Diseño tipo de un piezómetro



En ocasiones, es posible aprovechar piezómetros ya instalados previamente para la investigación de las aguas subterráneas de un emplazamiento. En estos casos la entidad debe asegurarse, a través de registros o informes previos, o por la inspección de los propios piezómetros, que las características constructivas de los mismos son razonablemente compatibles con las indicaciones establecidas en este documento.

Aunque no es recomendable, es igualmente posible muestrear las aguas subterráneas de pozos existentes de mayor diámetro instalados para la captación y aprovechamiento de las aguas. Con igual criterio se debe asegurar que sus características constructivas permiten captar las aguas que son objeto de interés para la investigación (intervalo de profundidad del que proceden las muestras, etc.). El muestreo de estos pozos normalmente es aconsejable no para la caracterización y evaluación de la afección sino para comprobar la concentración de contaminantes directamente en el punto de exposición de determinados receptores a considerar en el subsiguiente análisis de riesgos.

7.2 INSTALACIÓN DEL PIEZÓMETRO

Las tuberías se introducirán en el sondeo en adecuadas condiciones de conservación y limpieza, trasladándose al emplazamiento en el interior de envoltura plástica o similar. Aún así, si fuera necesario, se procedería a su limpieza previa con agua a presión. Para su manipulación e instalación se emplearán guantes desechables de látex, nitrilo, o similar, y no los guantes de protección mecánica empleados en el manejo del sondeo.

En aquellos casos en que el sondeo se haya entubado con revestimiento, la retirada del revestimiento y la instalación del filtro de grava se llevarán a cabo de forma acompasada, por este orden y alternando la operación en pequeños tramos de longitud, de manera que el filtro de grava se instale antes de que puedan colapsar las paredes del sondeo contra la tubería, pero de forma que tampoco el filtro de grava se solape en exceso con el revestimiento y pueda ser arrastrado posteriormente en el izado del mismo. Se controlará periódicamente la profundidad del techo del filtro para controlar la operación y evitar este arrastre.

En piezómetros profundos (>15m aprox.) se recomienda el empleo de centralizadores, y si la altura de la zona saturada es significativa, el vertido de los materiales del anular (especialmente bentonita) mediante tubería “tremie” colocada a 1 m de altura sobre el fondo del anular y posteriormente izada conforme se vaya rellenando el mismo.



Cuando interesa en un determinado PDM la investigación de las aguas subterráneas a diferentes niveles de profundidad, existe la posibilidad de instalar piezómetros anidados, que son varios piezómetros (máximo 3) instalados en la misma perforación, de mayor diámetro al habitual, separando unos tramos ranurados de otros por respectivos sellos de bentonita. En estos casos no obstante, se recomienda realizar perforaciones paralelas independientes, y cercanas unas de las otras, donde se instalarían piezómetros a una profundidad determinada en cada caso. El aislamiento hidráulico de los diferentes tramos ranurados de un piezómetro anidado depende de la eficacia de los sellos de bentonita y su adecuada instalación, existiendo riesgos inherentes en su integridad, sobre todo con el paso del tiempo.

7.3 DESARROLLO DEL PIEZÓMETRO

Una vez finalizado el piezómetro, se procederá a su desarrollo, entendido como el proceso de volver el estado de las aguas subterráneas que circundan al piezómetro a las condiciones previas a la construcción del mismo. Se elegirán para ello aquellos métodos que menor dispersión y alteración de la contaminación puedan ocasionar, preferentemente el sobrebombeo con bombas sumergibles de diferente capacidad y si la permeabilidad del medio no lo permite, con bailer, etc.. Se emplearán en cada piezómetro equipos en adecuado estado de conservación y limpieza, que no aporten contaminantes ni provoquen contaminación cruzada entre piezómetros del mismo emplazamiento.

De emplearse en el desarrollo bombas sumergibles, éstas serán de un caudal superior al que posteriormente se vaya a emplear en el purgado y en su caso la toma de muestras, y deberán ser limpiadas previamente antes de su utilización en cada piezómetro mediante la circulación de solución con agentes de limpieza adecuados (detergente alcalino, desorbente orgánico, etc.), seguida de ciclos de lavado con agua abundante. De emplearse baiders, serán de un solo uso o sometidos a tratamiento de limpieza similar al de las bombas.

Nunca se empleará la inyección de agua externa al piezómetro ni aire comprimido como técnica de desarrollo, ya que alterarían la hidrogeoquímica del acuífero en el entorno del piezómetro, especialmente la inyección de aire en emplazamientos en los que se haya de controlar compuestos volátiles o semivolátiles. El bombeo sí podría ser apoyado con agitación mecánica (subida y bajada de un émbolo) aunque en su justa medida, ya que este método puede alterar la disposición del filtro de grava, y en formaciones arcillosas que aporten muchos finos puede afectar a la superficie de la tubería.

El desarrollo del piezómetro deberá realizarse una vez transcurrido un cierto período de estabilización de la cementación realizada, recomendándose 24 horas, o bien realizarse una vez instalado el filtro de grava y antes de proceder al sellado con bentonita y cemento.



Previamente al desarrollo, se habrá extraído del piezómetro cualquier volumen de agua que hubiera sido necesario introducir durante la realización de la perforación o la limpieza del pozo, y que pudiera solaparse con las aguas evacuadas durante el desarrollo, o bien se realizará el desarrollo una vez haya transcurrido el tiempo necesario para permitir el desplazamiento de estas aguas fuera del radio de influencia del pozo.

El desarrollo del pozo se dará por concluido cuando se consiga una ausencia de turbidez en el agua extraída (o al menos una reducción significativa de la misma) y la estabilización de las lecturas de parámetros físico-químicos medidos “in situ” de forma periódica o continua en el agua extraída, de manera que existan ciertas garantías de equilibrio entre las aguas extraídas y las del acuífero.

Entre los parámetros físico-químicos se contemplará al menos la medida del pH y la conductividad, considerándose estabilizadas cuando la variación en tres lecturas consecutivas, realizadas cada cierto volumen extraído (p.ej. 10 litros) o cada 3-5 minutos de bombeo, no exceda de $\pm 0,1$ Ud pH y del $\pm 3\%$ para conductividad.

En algunos casos la litología y/o la permeabilidad (p.ej. acuitardos con elevada presencia de arcillas) del terreno no permitan conseguir la ausencia de turbiedad y/o la estabilización físico-química. En estas situaciones es comprensible que el desarrollo no consiga alcanzar parte o todos los objetivos, debiendo justificarse mediante las correspondientes medidas de recuperación del nivel piezométrico, y tratando al menos de evacuar la máxima cantidad de agua posible.

El agua extraída durante el desarrollo o el purgado de los pozos puede requerir tratamiento dependiendo de sus características, y nunca será vertida aguas arriba del piezómetro ni de otros pozos de control o puntos por muestrear.

Se registrarán todos los datos constructivos de los piezómetros instalados y del desarrollo realizado en los mismos (fechas de la instalación y el desarrollo, método de desarrollo, equipos empleados, volúmenes bombeados, evolución de las lecturas físico-químicas y espaciado -tiempo y volumen bombeado- entre las mismas, etc.). En el informe se adjuntarán los detalles constructivos de los piezómetros instalados y los datos fundamentales del desarrollo realizado y los criterios de finalización alcanzados.

8. INSTALACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE SONDAS Y POZOS DE MUESTREO DEL GAS DEL SUELO



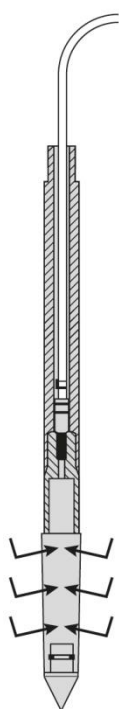
Para el muestreo de la fase gaseosa del suelo se suelen emplear sondas de vapor o bien pozos.

Las sondas de vapor tienen un tamaño mucho más reducido en diámetro y en la profundidad que pueden alcanzar, y pueden ser instaladas por empuje directo en el terreno o bien realizar una perforación previa.

Cuando se emplea el empuje directo, mediante una pequeña máquina tipo oruga se introduce en el terreno hasta la profundidad deseada una varilla de acero hueca con punta, normalmente de 2,5 a 4 cm $\varnothing$, por cuyo interior se inserta posteriormente una tubería de 3-8 mm $\varnothing$, que es acoplada gracias a un adaptador enroscado y ejerciendo cierta presión a la punta. El extremo superior de la tubería, que sobresale del nivel de la superficie se acopla al tren de muestreo. La varilla hueca se retrae con la máquina una cierta distancia (15 a 30 cm) separándose de la punta y creando un vacío abierto en el que el gas del suelo puede penetrar directamente hacia el interior de la tubería.

Alguna variante de este método permite la instalación de una tubería o implante ranurado con filtro de grava, aunque para ello es más recomendable partir de una perforación, y lo habitual en este tipo de muestreo es que no se instale filtro, y acabado el muestreo la sonda se retire.

Figura 9: Sonda de vapor hincada de punta retráctil



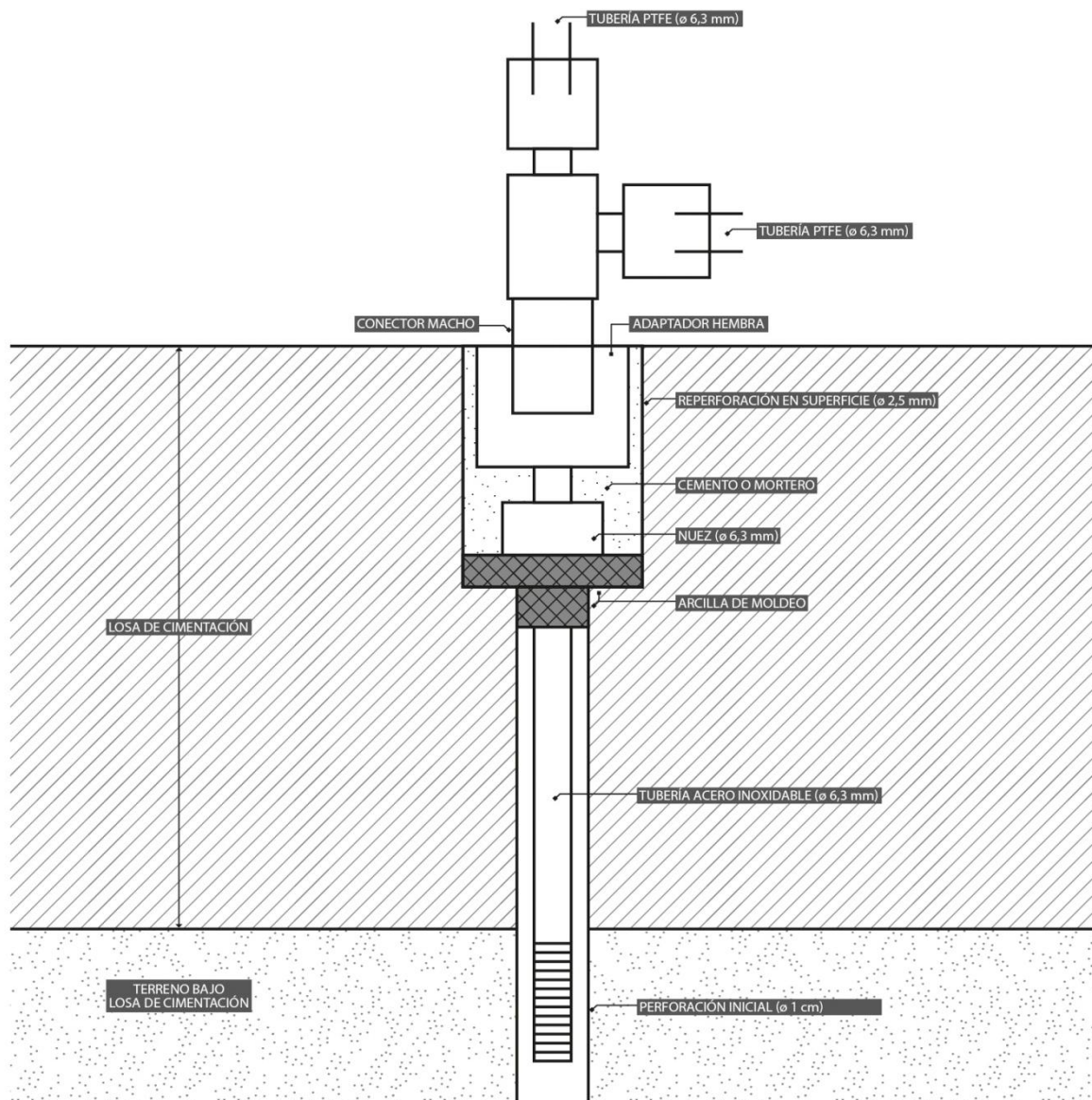
Este tipo de sondas son fundamentalmente útiles cuando no se requiere una medida muy precisa (p.ej. medidas in situ con PID) y el muestreo se emplea más bien para delimitar la extensión de una zona de afección en el subsuelo.

Cuando se realiza perforación para la instalación de sonda, p.ej. mediante taladro a rotación con varillas de rosca sin fin o mediante martillo percutor con barrena hueca, se emplean diámetros igualmente pequeños como 1 cm $\varnothing$ hasta llegar a la profundidad deseada, y posteriormente en superficie se reperfora a un diámetro algo mayor (2,5 cm $\varnothing$) hasta aproximadamente 1,3 cm de profundidad para instalar bajo rasante el cabezal de conexión de la sonda con el tren de muestreo.

En el centro de la perforación se instala tubería ranurada o perforada de unos 6 mm $\varnothing$, que se dejará suspendida unos 15 cm sobre el fondo de la perforación para que no quede obstruida, y que en superficie va equipada con una tapa o válvula de cierre hermético para impedir la entrada de aire atmosférico al interior de la tubería.



Figura 10: Sonda de vapor en perforación bajo solera



Para evitar igualmente la entrada de aire por el anular al interior de la perforación, se sella al menos el estrechamiento de la perforación con arcilla de moldeo y posteriormente se rellena el perímetro del cabezal más ancho con cemento. No obstante para evitar esta infiltración de aire y evitar igualmente la conexión de zonas del suelo sin interés con los intervalos que interesa muestrear, es más apropiado instalar un relleno en el anular de la perforación de similar forma a como se realiza en un piezómetro.

Respecto al amular, el filtro de grava debe extenderse desde el fondo de la perforación hasta unos 15 cm sobre el intervalo de muestreo de interés. Sobre el filtro de grava se dispone sello de bentonita granular (mejor que pellets o chips) hasta la base del cabezal de la sonda, cuya longitud ideal debería ser al menos de unos 70 cm. La bentonita debe hidratarse con la cantidad imprescindible de agua limpia, a

excepción de los primeros 30 cm sobre el filtro de grava, con objeto de no facilitar su percolación por el mismo. Opcionalmente puede considerarse la colocación de un separador de PTFE entre el filtro de arena y la bentonita seca para garantizar el aislamiento entre ambos niveles.

Este tipo de sondas son las más adecuadas para el muestreo junto a y bajo cimentación, especialmente en este último caso en el que se requiere realizar perforaciones lo más livianas posibles, y al ser de instalación permanente, facilitan la realización de varias rondas de muestreo en los mismos PDMs y la posterior comparación de resultados.

La instalación de pozos permanentes permite realizar la testificación de los materiales atravesados durante la perforación, y por tanto una mejor selección de los niveles de profundidad de mayor interés para el muestreo. En caso de emplear sondas temporales esta información no es normalmente accesible, debiéndose conocer la litología por otros medios (sondeos previos, etc.).

La otra opción de muestreo sería mediante pozos, que son instalados en perforaciones realizadas por sondeo mecánico, y que poseen diseños, diámetros y profundidades similares a las de un piezómetro, salvo que en este caso la profundidad de interés es la zona no saturada o la inmediatamente superior a la zona capilar. El relleno del anular y el cierre hermético de estos pozos debería ser equivalente al descrito para las sondas de vapor permanentes. Esta posibilidad puede ser útil en muestreos exteriores y en muestreos junto a cimentación en los que la zona de interés esté relativamente profunda y no sea viable la instalación de sondas.

Los materiales recomendados para las tuberías, y en general para todo el tren de muestreo son el acero inoxidable y el polipropileno. PVC, polietileno y silicona deberían evitarse mientras sea posible.

Para obtener más detalles sobre el diseño y la instalación de sondas de vapor/pozos de muestreo se puede acudir a los métodos EPA ERT SOP 2042 y 2082 además de la ISO 10381-7.

Durante la perforación y/o la instalación de la sonda o pozo se produce una entrada de aire atmosférico en el subsuelo que puede interferir en el subsiguiente muestreo.

Para evitarlo se ha de permitir un período de estabilización suficiente para la recuperación de las condiciones iniciales previas a la construcción, que se estima en 2 horas para las sondas instaladas por empuje directo y de 48 h para el resto.

Alternativamente, se puede desarrollar la sonda/pozo evacuando al menos 5 veces el volumen de aire



contenido en su interior, incluyendo el filtro de grava, mediante la aplicación de vacío. En PDMs de baja permeabilidad este vacío debe ser inferior a 250 mbar, e inferior a 25 mbar si se trata de materiales permeables. En PDMs de baja permeabilidad no obstante puede que no sea posible evacuar todos los volúmenes indicados. También es aconsejable apoyarse en la monitorización in situ de las concentraciones de VOCs.

Una vez desarrollado o transcurrido el período de equilibrio necesario, se puede proceder al muestreo. Una vez instalado el tren de muestreo, y antes de proceder al mismo no obstante, se deben realizar dos tipos de pruebas para asegurar la correcta instalación y estanqueidad del dispositivo :

- Prueba de fugas o filtraciones.

Sobre la ubicación de la sonda/pozo se coloca una caja-cubierta que engloba igualmente el dispositivo para la toma de muestra (p.ej. canister) cerrado y el tren de muestreo que los comunica.

En dicha caja se introduce una concentración conocida (10-20%) de un gas trazador inerte (típicamente helio), que es medida mediante medidor in situ.

El tren de muestreo se prolonga hasta otra caja-pulmón en cuyo interior se dispone una bolsa Tedlar donde se toma muestra.

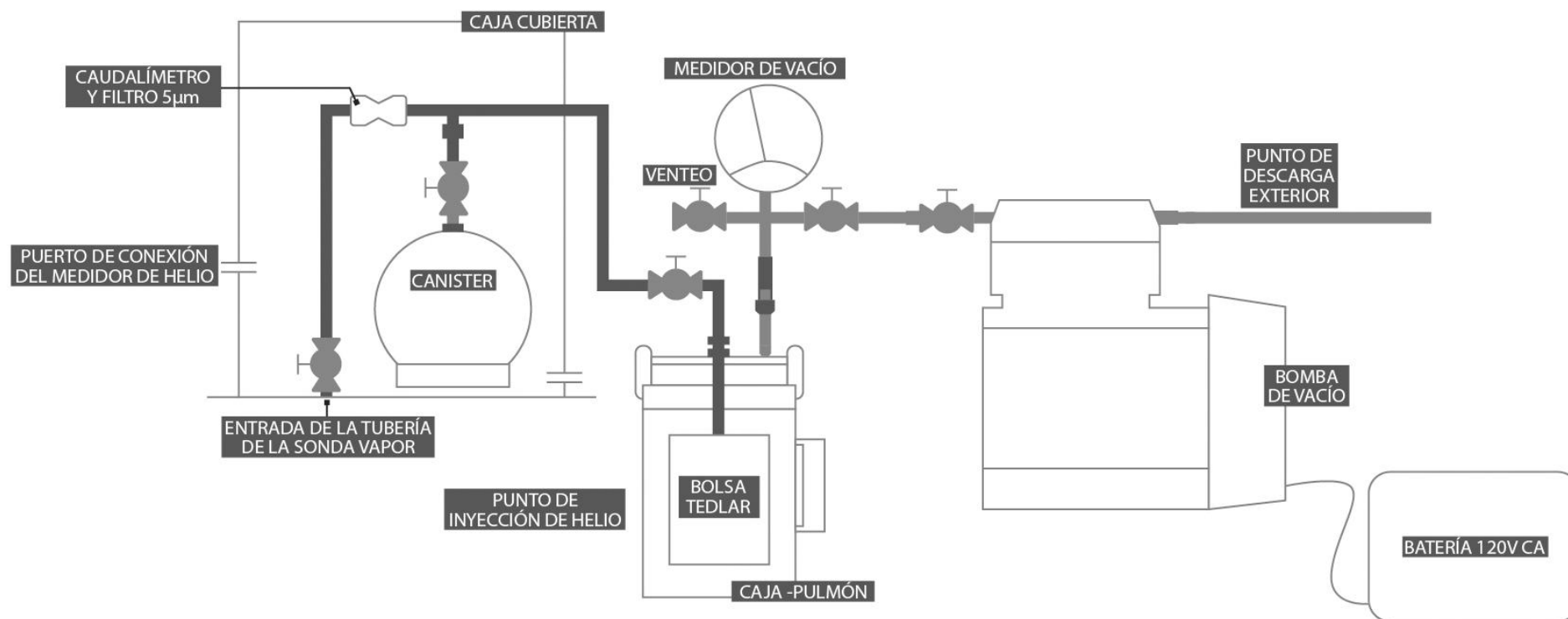
La ausencia de fugas se comprueba si la concentración de helio en la bolsa Tedlar es similar a la de la caja donde se ubica el tren de muestreo para el canister (no aumenta más de un 10%).

- Prueba de vacío.

Consiste en aplicar un vacío de unos 250 mbar al tren de muestreo, cerrar las válvulas de los extremos del tren y comprobar que el vacío se mantiene en esos niveles durante al menos 1 minuto.



Figura 11: Configuración del tren de muestreo de vapores para una prueba de fugas

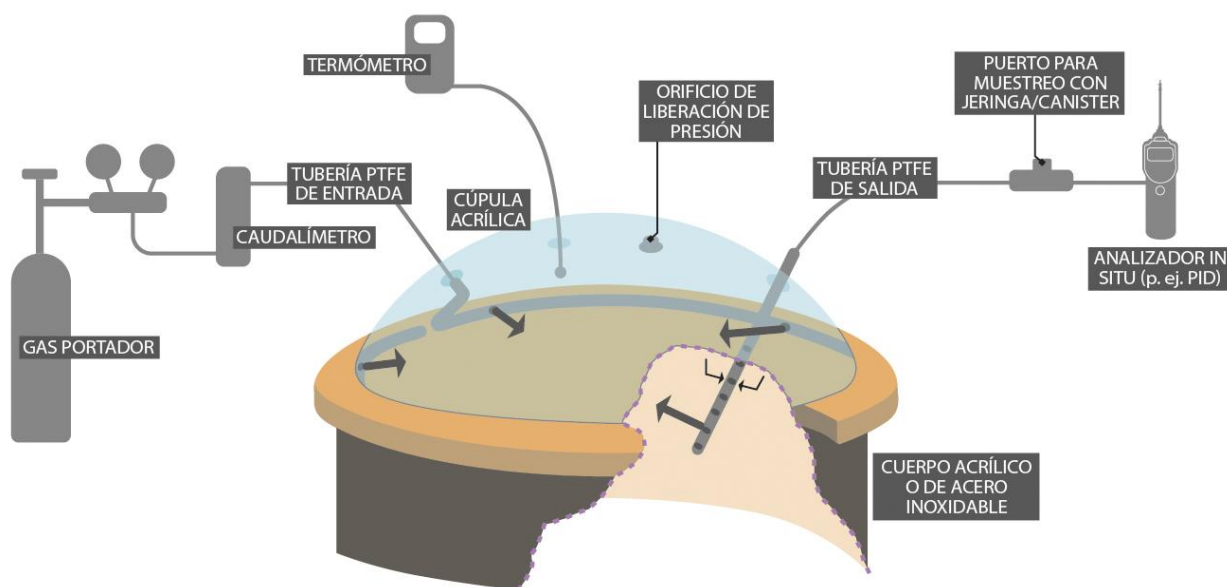


9. INSTALACIÓN DE CÁMARAS DE FLUJO PARA EL MUESTREO DEL GAS DEL SUELO

Para el muestreo de la fase gaseosa del suelo también podrían emplearse cámaras de flujo si la afección fuera muy superficial.

Se trata de campanas compuestas en su diseño estándar por un cilindro acrílico o de acero inoxidable de 0,41 m de diámetro, unido por una de sus aberturas a una cúpula acrílica transparente que sirve de tapadera, y que se enclavan por el otro extremo en el terreno unos 2,5 cm de profundidad, dejando un volumen interno de 0,03 m³.

Figura 12: Muestreo de emisiones de vapores del suelo mediante cámara de flujo



La cúpula presenta varios orificios. Por uno de ellos, se introduce una tubería de PTFE de unos 0,6 cm de diámetro y 1,3 m de longitud, mediante la cual, y a partir de una botella de gas comprimido provista de caudalímetro, se introduce una corriente a bajo caudal de aire de grado ultra puro que actúa como gas portador. La línea de entrada, una vez atraviesa el orificio, se hace discurrir por el perímetro interior de la campana completando una vuelta, próxima a la unión del cilindro con la cúpula. Presenta al menos cuatro orificios equidistantes que expulsan el aire hacia el centro de la campana, lo que unido a la geometría curva y simétrica de la misma, facilitan una mezcla completa y homogénea del gas en su interior.

Otro de los orificios de la cúpula está reservado para la línea de toma de muestras, que consiste en otra tubería de PTFE de igual diámetro, a la que se acopla el equipo PID o un analizador portátil cuando se quieren hacer lecturas in situ, o bien un canister o un tubo sorbente para el análisis en laboratorio.

La cúpula dispone de dos orificios más, uno de ellos para mantener la presión atmosférica dentro de la campana, y otro para tomar lecturas de temperatura del interior.

El caudal del gas de entrada es de especial importancia, puesto que hace variar la concentración de volátiles en la muestra. A menor caudal, mayor concentración de volátiles y menor límite de cuantificación puede obtenerse. En teoría, la tasa de emisión de contaminantes ($\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$), que es el parámetro caracterizado por este método, no se ve alterada por el empleo de un caudal mayor o menor porque las diferencias son compensadas con las concentraciones, pero en la práctica se han observado desviaciones negativas con los caudales más bajos. Para evitarlo, la metodología recomienda un caudal de entrada de aire estándar de $0,005 \text{ m}^3/\text{min}$.

La correcta inserción en el terreno de la campana y su aislamiento de los vientos superficiales también tiene una importante influencia en los resultados. Se debe respetar la profundidad estándar de inserción (2,5 cm), puesto que mayores profundidades pueden incrementar las tasas de emisión por la alteración de la estructura del suelo. En sentido contrario, la aparición de grietas en el terreno junto a los bordes de la campana puede facilitar la entrada de aire y la dilución de las concentraciones obtenidas, por lo que se debe colocar una masilla asilante, p.ej. de bentonita, entre la superficie del terreno y la pared de la campana.

10. TOMA DE MUESTRAS

La toma de muestras de suelos y aguas subterráneas deberá realizarse siguiendo preferentemente métodos normalizados (p.ej. UNE-ISO 10381-2, ISO 5667-11, etc.). Se tendrán en cuenta no obstante una serie de indicaciones generales.

10.1 TOMA DE MUESTRAS SÓLIDAS

Los equipos y material empleados en la toma de muestra de suelos deberán estar en adecuado estado de conservación y limpieza, de manera que no puedan introducir contaminantes en las muestras tomadas a partir de restos de pintura, óxidos, aceites lubricantes o restos adheridos de otras muestras tomadas. El instrumental empleado en contacto con las muestras deberá ser limpiado de forma adecuada de un punto a otro de muestreo, y entre la toma de dos muestras sucesivas, o bien emplear material de un solo



uso.

La parte de las muestras que han entrado en contacto con los equipos de perforación deberán desecharse siempre que sea posible a la hora de tomar la muestra e introducirla en los recipientes. Así por ejemplo, en los sondeos mecánicos en materiales cohesivos se desechará con precaución la cara exterior de los testigos de sondeo, al igual que los obtenidos con muestreadores de ventana y sondas manuales en las zonas en las entran en contacto con ellos.

En las catas, se raspará con espátula o similar la pared de donde se vaya a extraer la muestra, para eliminar la pátina que deja la fricción del cazo de la excavadora, y acceder a suelo no expuesto anteriormente. En caso de tomar las muestras del material extraído, si se toma directamente del cazo se tomará una muestra del conjunto de material extraído en la palada pero tratando de evitar el más próximo al fondo del cazo, y en caso de tomar del apilamiento de material depositado en superficie, se retirará primero el material más superficial del montón para acceder con preferencia al interior de la pila.

También se desecharán aquellos tramos de sondeo con una elevada probabilidad de contener materiales de otros niveles caídos al fondo de la perforación, y que se advierten normalmente por su aspecto de materiales de derrubio en los centímetros más superficiales de las maniobras. Igualmente en los sondeos semimecánicos realizados con muestreadores de ventana, se rasparán los materiales normalmente adheridos a la abertura de la ventana durante el izado de la batería.

En los testigos obtenidos con sondas manuales, se rasparán con idéntico fin los laterales visibles del testigo, pues suelen arrastrar igualmente materiales de niveles superiores en el izado de la sonda, además del material más próximo a la horquilla, que a partir de la segunda maniobra suelen incorporar materiales caídos al fondo de la perforación.

Las muestras serán tomadas preferentemente en bloque si son medianamente cohesivas, una sección completa del testigo de sondeo, un prisma regular extraído de la pared de la cata, etc., y con la menor cámara de aire posible. En caso de realizar muestras compuestas, quedará constancia y se indicará en informe cuántas submuestras se han empleado, volumen aproximado, intervalo de profundidad al que corresponden y procedimiento de composición.

Las muestras tomadas para el análisis químico en el que se basará la evaluación de la investigación sólo tendrán esa finalidad, no pudiendo aprovechar para ello muestras que hayan sido manipuladas para otros objetivos, como la medición “in situ” de compuestos orgánicos volátiles, ensayos “in situ” geotécnicos, etc.



10.2 TOMA DE MUESTRAS LÍQUIDAS

La toma de muestras de aguas subterráneas debe efectuarse transcurrido un cierto período de recuperación del acuífero tras el desarrollo de los diferentes piezómetros instalados, el necesario para la restitución del acuífero a sus condiciones iniciales, con objeto de que las muestras correspondan al entorno inmediato a cada piezómetro. Este período difiere según las fuentes consultadas desde 72h a una semana, por lo que no es posible establecer reglas fijas, y deberá establecerse en función de las características hidrogeológicas del emplazamiento (mayor tiempo a menor permeabilidad) y de la proximidad entre piezómetros (mayor tiempo si existen piezómetros que hayan podido interferirse entre ellos durante el desarrollo).

Este período debería contemplar no sólo la recuperación del nivel freático a su posición original, sino también la restitución del sentido original del flujo subterráneo durante un tiempo prudencial, suficiente para el desplazamiento de la masa de agua en torno a los puntos de muestreo.

10.2.1 Purgado de piezómetros y pozos

Previo a la toma de muestras (ya sea tras un desarrollo o en seguimientos posteriores) deberá procederse a un purgado del piezómetro o en su caso el pozo. El objetivo del purgado es la eliminación de las aguas que están en contacto con un medio (el piezómetro) diferente al del acuífero, y que en determinadas ocasiones, puede quedar retenida o estancada en el mismo durante largo tiempo, produciéndose alteraciones importantes en su composición y perdiendo representatividad respecto a las aguas del acuífero que se quieren muestrear.

Los equipos empleados en el purgado, normalmente bomba sumergible, bomba peristáltica, bailer..., deben ser de un solo uso o bien haber recibido el tratamiento de limpieza indicado en el apartado anterior, para evitar la contaminación cruzada.

Para el purgado de un pozo o piezómetro se debe retirar un volumen de agua igual a 3-5 veces el volumen de la zona saturada en el piezómetro, tomando en consideración el diámetro total de la tubería más el filtro de grava instalado alrededor de ésta (diámetro de la perforación) cuando es conocido. Alternativamente se puede retirar el volumen necesario para alcanzar equilibrio físico-químico conforme a los criterios mencionados anteriormente, pero siempre evacuando al menos 1 vez el volumen de la columna saturada.



En materiales poco permeables el purgado no debería deprimir significativamente el nivel piezométrico con objeto de evitar un agotamiento del mismo y los efectos indeseados que ello puede conllevar (aireación y pérdida de compuestos orgánicos volátiles, etc.), por lo que en estos casos se realizarán extracciones con bombas de pequeño caudal o bailers, realizando paradas intermitentes si fuera necesario, y si ello no fuera suficiente, se llevará a cabo el muestreo sin completar el purgado indicado por defecto, siempre que el nivel haya recuperado lo suficiente para recuperar al menos el 50% de la columna saturada inicial. Estas limitaciones en el purgado deben ser reflejadas en el informe de resultados.

Otra alternativa posible es la realización de un micro-purgado, consistente en la extracción localizada en el tramo de donde se va a tomar la muestra, de menores volúmenes de agua a un caudal muy bajo (< 1 L/min, típicamente entre 0,1-0,5 L/min), con ayuda de bombas de tipo bladder. Este sistema es especialmente indicado en piezómetros con una elevada altura de zona saturada y buena permeabilidad, con objeto de evitar bombeos importantes de agua, y para el análisis posterior de contaminantes susceptibles de volatilización con bombeos más enérgicos como los compuestos orgánicos volátiles, ya que provoca unos descensos despreciables del nivel piezométrico (< 10 cm). En este caso el punto final del purgado se determina por estabilización de parámetros físico-químicos de igual forma a lo indicado anteriormente para el desarrollo.

Por cualquiera de los métodos de purgado seguidos, antes de proceder a la toma de muestras el nivel piezométrico debería haberse recuperado en su mayor parte, y como mínimo un 50% de la altura de la columna saturada inicial.

Si existieran en el emplazamiento contaminantes en fase libre, sobre el nivel freático (fases líquidas móviles menos densas que el agua -LNAPL-) o en la base del acuífero (fases líquidas más densas que el agua -DNAPL-), deberá realizarse siempre que sea posible una estimación de su espesor aparente. La presencia de fase libre dificulta o imposibilita un adecuado muestreo del agua subterránea, ya que obligaría a evacuar aguas fuertemente contaminadas durante los bombeos a efectuar en el desarrollo y purgado, facilitaría su propagación por la alteración del flujo subterráneo, e incorpora a las muestras contaminantes no disueltos en las aguas subterráneas. Además, se considera un foco primario de contaminación que debe ser eliminado con independencia de otras consideraciones de riesgo, por lo que el muestreo de aguas subterráneas en los piezómetros afectados por fase libre no tiene excesiva utilidad.

En el caso de existir fase libre densa sí es factible muestrear la fase disuelta por encima de la fase libre con muestreadores de profundidad discreta, aunque tampoco sería adecuado purgar y tampoco tendría el muestreo excesiva utilidad ya que constituye igualmente un foco primario de afección que precisa ser



eliminado.

Una vez desaparezca la fase libre tras la correspondiente remediación, es cuando se debe desarrollar y purgar (si la fase libre se detecta durante la construcción del piezómetro), o bien purgar (si se detecta fase libre en un piezómetro ya construido) y proceder a la toma de muestras.

10.2.2 Muestreo de piezómetros y pozos

Existen diversos tipos de equipos para el muestreo de aguas subterráneas, cada uno con sus ventajas e inconvenientes según las condiciones de muestreo y los contaminantes a analizar, y no existiendo por tanto un único sistema de muestreo aplicable a todos los casos. Deberá seleccionarse el más idóneo para cada caso siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 5667-11 “Guidance on sampling of groundwaters”.

Entre los más válidos para cualquier tipo de parámetro, las bombas “bladder”, los bailers abiertos (estos últimos no tanto para volátiles y gases disueltos), y también las bombas inerciales (salvo para gases disueltos). Las bombas eléctricas sumergibles son en general válidas para todos los supuestos, aunque con cierta limitación para gases disueltos y compuestos orgánicos volátiles cuando operan a máximo caudal; presentan además frecuente contaminación cruzada si están fabricadas de materiales plásticos y existen compuestos organoclorados en las muestras a tomar, por lo que deben evitarse en ese caso para estos compuestos. Las bombas peristálticas, así como las bombas que emplean aire en contacto con las muestras para su elevación (gas-drive y gas-lift), están desaconsejadas en la toma de muestras para análisis de compuestos orgánicos volátiles y gases disueltos. Las peristálticas deben utilizarse únicamente a menos de 6 metros de profundidad en caso de considerarse en el estudio gases disueltos

Los bailers empleados deben ser de un solo uso y no haberse empleado previamente en el purgado del piezómetro cuando la contaminación pueda adherirse a las paredes del mismo (p.ej. hidrocarburos). Las bombas pueden ser de un solo uso o bien reutilizarse siempre y cuando se sometan a tratamientos de limpieza exhaustivos y controles continuos de calidad (blancos). Las bombas empleadas no deben ser las mismas que las empleadas en el desarrollo o el purgado, y han de operar a caudales normalmente inferiores a éstas.

10.3 TOMA DE MUESTRAS GASEOSAS



10.3.1 Toma de muestras en sondas/pozos de vapor

Tras el período de estabilización o el desarrollo comentados con anterioridad, la sonda/pozo de vapor y el tren de muestreo deben ser purgados previamente a la toma de muestra de la fase gaseosa del suelo. Se debe purgar al menos un volumen de aire igual a 3-5 veces el contenido en la sonda/pozo (incluyendo filtro de grava) más el contenido en las tuberías del tren de muestreo hasta llegar al recipiente de muestreo.

Al igual que en el desarrollo también resulta conveniente apoyarse en medidas de PID o FID para acometer el purgado.

El caudal de purgado debe ser igual o superior a 100 mL/min para minimizar el tiempo de residencia del gas por el tren del muestreo, aunque en terrenos de baja permeabilidad tampoco podrá ser superior a 200 mL/min.

El tren de muestreo desde la boca de la sonda/pozo hasta el recipiente de muestreo debe tener la longitud imprescindible, no más de 1 m. Los tubos deben estar hechos de acero inoxidable o polipropileno, evitando el uso de silicona, polietileno y PVC.

Las muestras gaseosas pueden ser tomadas en canister de acero inoxidable de 1 ó 6 litros, bien de forma activa (mediante el bombeo del aire) o pasiva (a presión sub-atmosférica). En los muestreos activos el flujo de entrada de muestra debe ser inferior a 200 ml/min (5 min para el llenado del canister de 1 litro) con objeto de minimizar la reducción de la presión de poro y la alteración del equilibrio entre fases. Las bolsas Tedlar no son normalmente recomendadas para un análisis de precisión, presentan trazas en los blancos, el transporte por avión es más complejo (no pueden ser llenadas al completo) y los tiempos recomendados para el análisis son más estrictos (48 h).

También pueden ser tomadas en tubos sorbentes, a los que se puede dirigir el gas de forma activa (mediante una bomba) o bien funcionar de forma pasiva. En los muestreos activos el flujo de entrada de muestra debe ser inferior a 150 ml/min para tubos con diámetros de 3 mm y de 250 ml/min para tubos con diámetros de 4 mm. En caso de emplear tubos sorbentes se debe tener en cuenta que pueden alcanzar su punto de saturación de forma relativamente rápida para algunos compuestos.

10.3.2 Toma de muestras en cámaras de flujo



Antes de proceder a la toma de muestras, se debe hacer circular el gas portador por el interior de la campana hasta alcanzar condiciones estacionarias.

Dichas condiciones se entiende que se alcanzan tras un tiempo de estabilización igual a 3-4 veces el tiempo de residencia del gas en la cámara, el cual se obtiene dividiendo el volumen de la cámara (0,03 m³ en el diseño estándar), por el flujo de aire de entrada a la misma (0,005 m³/min valor recomendado). En condiciones estándar este tiempo de estabilización sería de 24 min..

La temperatura que se alcanza en el interior de la campana es un factor de importancia, pues se ha demostrado que influye en las tasas de emisión obtenidas, y puede haber incrementos importantes respecto a la temperatura ambiental en épocas de gran insolación. Con temperaturas ambientales de 28°C, el incremento de temperatura podría ser de 9°C a los 30 minutos.

Durante el muestreo se han de registrar ambas temperaturas y tratar de minimizar estas diferencias (p.ej. evitando la insolación directa de la cámara). La metodología EPA contempla la corrección de las tasas obtenidas en función de las temperaturas alcanzadas en el interior de la cámara respecto a una temperatura nominal de referencia, que para el caso que nos ocupa, en el que se persiguen caracterizar las tasas reales de emisión en las diferentes condiciones climáticas del año, puede ser la temperatura media ambiental registrada durante el muestreo.

Para obtener más detalles del cálculo de la tasa de emisión en función del caudal de gas portador y la concentración de contaminante obtenida, y su corrección en función de la temperatura, acudir al apdo. 3.8 del documento “Measurement of gaseous emission rates from land surfaces using an emission isolation flux chamber. User’s guide”.

El muestreo debe llevarse a cabo con prontitud tras el purgado, pues su dilatación en el tiempo no conlleva generalmente condiciones más representativas sino todo lo contrario (incrementos de temperatura en el interior de la campana, condensación, agotamiento de la fuente, etc.).

El procedimiento de toma de muestra, bien en canister o en tubos sorbentes, sería muy similar al empleado en las sondas/pozos de vapor. El caudal de extracción no debería ser superior a 2 L/min, pues de lo contrario podría crear una depresión en el interior de la campana que podría incorporar aire portador en exceso o aire ambiente a través del orificio ideado para mantener la presión atmosférica en el interior de la campana.

Si se produjera condensación en el interior de la cámara debe registrarse este hecho pues puede reducir la concentración en el gas de los compuestos contaminantes solubles en agua. La materiales de la



campana deben igualmente limpiarse y secarse a conciencia entre diferentes puntos de muestreo.

10.3.3 Consideraciones generales

Es conveniente registrar las condiciones ambientales existentes durante los muestreos de la fase gaseosa del suelo. Así por ejemplo de registrarse la presión dentro de la sonda vapor/pozo y la presión exterior a la misma (en el interior del edificio, en el exterior, etc.), temperaturas, velocidades del viento, si ha habido lluvias recientes, funcionamiento de los sistemas de ventilación/climatización, profundidad del nivel freático, etc. ya que estos factores pueden por ejemplo explicar diferencias entre sucesivas mediciones. Se pueden emplear para ello estaciones meteorológicas propias o datos extraídos de estaciones fijas que se encuentren relativamente próximas al emplazamiento.

De todas las variables atmosféricas que pueden influir en el muestreo, la lluvia es la más determinante. En líneas generales, aún dentro de la época invernal, puede ser prudente evitar la coincidencia del muestreo con episodios recientes de lluvias, sobre todo en muestreos exteriores o junto a cimentaciones, ya que la misma limita el transporte de la fase vapor por el suelo. Se recomienda respetar una separación de una semana entre el muestreo y la lluvia ($> 0,2$ mm aproximadamente) más reciente.

Del mismo modo, se debe evitar el muestreo cuando la temperatura ambiental sea inferior a la temperatura del gas del suelo, ya que ello puede provocar la condensación de la muestra por el tren de muestreo, reduciéndose la presión de vapor y la concentración de la muestra.

A igualdad de otros factores, el muestreo debe llevarse a cabo preferiblemente en jornadas con velocidades de viento moderadas o bajas.

Todos los componentes del sistema de muestreo que entran en contacto con el gas del suelo, deben ser de un solo uso o bien ser descontaminados antes de un nuevo uso mediante calentamiento con soplador de aire caliente, en estufa, etc.

En muestreos activos, el sistema de bombeo se debe verificar antes y durante su uso.

10.4 CUSTODIA Y CONSERVACIÓN DE MUESTRAS

Los recipientes a emplear, la conservación de muestras de suelos y aguas subterráneas, y el tiempo



máximo recomendado para el análisis deberán ser acordes con los requerimientos de los métodos analíticos que posteriormente van a ser empleados (consultar con laboratorio subcontratado), o en su defecto, con los requisitos establecidos con carácter general por métodos normalizados de toma de muestras, fundamentalmente ISO 18512:2007 “Soil quality – Guidance on long and short term storage of soil samples” para suelos e UNE-EN ISO 5667-3:2013 Calidad del agua. Muestreo. Parte 3: Conservación y manipulación de las muestras de agua.

Las muestras de suelo no requieren normalmente ningún tipo de preservación química, salvo para el muestreo de compuestos orgánicos volátiles (COV's) en las que el tratamiento de extracción se inicie en campo sumergiendo por ejemplo la muestra en viales con metanol previamente tarados (ej. ASTM D4547-06, ISO 22155). Las muestras de aguas sí requieren preservación (acidificación, alcalinización) para algunos parámetros (compuestos orgánicos volátiles, metales, cianuros, etc.). La preservación química de las muestras se realizará preferentemente en campo, empleando pequeñas cantidades de reactivos concentrados de alta calidad (p.ej. para análisis), en especial para aquellos parámetros con menores tiempos recomendados de análisis, a menos que sea contraproducente para otras etapas analíticas.

Las muestras de aguas pueden requerir también una filtración previa a su conservación, (como en el caso del análisis de metales disueltos) o siempre que los métodos normalizados de conservación de muestras reflejados en la norma ISO 5667-3, o las indicaciones expresas del laboratorio contratado para el análisis así lo requieran. No se considera aceptable la filtración de muestras en otras circunstancias diferentes a las indicadas, ya que podría interferir en los resultados.

El filtrado y la acidificación en campo de muestras de aguas para metales disueltos pueden ser complicados en muestras en las que sea inevitable la presencia de sólidos en suspensión y en función también del volumen de muestra necesario. En estos casos se acepta también una acidificación y filtración de las muestras en laboratorio si el tiempo transcurrido tras la toma hasta su recepción de laboratorio es inferior a 48 h.

Las muestras de aguas, con carácter general, (y también las de suelos cuando se estén estudiando parámetros tales como compuestos orgánicos volátiles, Cr VI y Hg volátil) deberán ser refrigeradas y mantenidas en la oscuridad, desde el mismo momento de la toma de muestra, y continuando durante el proceso de transporte, almacenamiento y envío al laboratorio analítico donde se destinen.

Las condiciones de temperatura requeridas varían según las fuentes disponibles, pudiéndose admitir que la temperatura de las muestras desde el momento del muestreo vaya reduciéndose progresivamente durante la jornada de campo, sin repentes significativos en tiempo y magnitud, hasta conseguir por lo



general una temperatura de $\leq 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ a su finalización, y que ésta se mantenga así durante el almacenamiento temporal de las mismas (frigoríficos, etc.) y el transporte antes de su recepción en laboratorio. Se conservarán registros en continuo de las temperaturas de conservación conseguidas desde el momento de la toma de muestras hasta su recepción en el laboratorio.

En caso de presencia de contaminantes volátiles, deberá minimizarse todo lo posible la exposición de la muestra a la atmósfera ambiente. Deberá tomarse suficiente muestra para llenar al máximo los recipientes empleados, evitando dejar cámaras de aire que favorezcan la volatilización de los analitos. No obstante, en el caso de muestras de suelo, tampoco se disgregarán en exceso los trozos de testigo cohesivos para conseguir esta reducción de la cámara de aire, ya que se puede obtener un efecto contrario al deseado al exponer el interior del testigo al aire ambiente.

Las muestras de la fase gaseosa del suelo deben mantenerse en oscuridad, variando el resto de las instrucciones de conservación dependiendo del soporte de muestreo empleado. Los canisters y recipientes similares no deben conservarse en frío, ya que ello provocaría la condensación de la humedad, y los tiempos de custodia permitidos son amplios (oscilan sobre 30 días). Los tubos sorbentes sin embargo si es apropiado conservar en frío sobre cama de carbón activo, y los tiempos de custodia son inferiores (14 días aproximadamente). Seguir no obstante las indicaciones específicas del laboratorio.

Los ensayos deberán realizarse teniendo en cuenta los plazos recomendados de análisis establecidos en los métodos normalizados para los analitos estudiados.

Las muestras estarán identificadas en todo momento desde su toma, mediante etiqueta resistente a la humedad donde conste al menos el código de la muestra, la fecha y la hora del muestreo. La etiqueta no reflejará la identidad del titular del emplazamiento investigado, para salvar su confidencialidad frente al laboratorio que realiza las analíticas. La identificación dada en campo a las muestras, que deberá ser única y no confundible con otras muestras de ese o de otros trabajos, se mantendrá durante todo su proceso de gestión y en todos los registros e informes relacionados con la investigación, incluyendo los certificados emitidos por el laboratorio de ensayo.

Se dispondrá de registros de la cadena de custodia, donde se refleje la gestión realizada a las muestras desde el momento de su toma hasta su recepción en el laboratorio de destino: fecha y hora de toma, codificación única, botellería empleada, preservación aplicada, temperaturas de conservación desde la toma hasta la recepción por el laboratorio, equipos empleados en la conservación y la medida de la temperatura, fecha y hora de envío a laboratorio y de recepción en el mismo, etc. Se adjuntará en el



informe copia de las cadenas de custodia de las muestras tomadas en el emplazamiento.

10.5 CONTROL DE CALIDAD DEL MUESTREO

Deberá llevarse a cabo un programa de control de calidad de los muestreos, que cubra especialmente el tratamiento de limpieza de los equipos y materiales aplicado en todo el proceso, el cuidado y la limpieza con la que se realiza la toma de muestras, así como el grado de preservación y conservación de las muestras conseguido desde el momento de toma hasta el análisis.

Se realizará para ello al menos, con carácter general, un blanco de muestreo por cada campaña y matriz analizada (suelo, agua), consistente en el enjuague controlado de los equipos de muestreo empleados con agua exenta de los analitos estudiados, incluido el equipo de perforación de suelos empleado (batería de perforación, cazo de retroexcavadora, muestreador de ventana) y el equipo de toma de muestras de agua utilizado (bailer y especialmente bomba), con el estado habitual de limpieza con el que se emplean, recogiendo el agua obtenida en cada caso en los recipientes habituales de muestreo, con la preservación y conservación habituales, y analizando en el agua recogida en cada caso, con los mismos métodos analíticos, la batería de parámetros analíticos que correspondan a las muestras de suelo o agua (según el caso) reales de la inspección.

El agua empleada en la confección del blanco no debe incluir, siquiera a nivel de trazas (especialmente en el blanco del muestreo de aguas), los contaminantes analizados, puesto que de lo contrario no se podrán extraer conclusiones válidas sobre el proceso de muestreo llevado a cabo. Algunas aguas desionizadas incorporan dichas trazas, por lo que se recomienda se empleen materiales de calidad contrastada (p.ej. agua HPLC).

Alternativamente, el blanco de suelos también puede ser llevado a cabo introduciendo la batería de perforación en un volumen de suelo certificado o caracterizado exento de contaminación.

Igualmente será preciso tomar un blanco del muestreo de la fase gaseosa del suelo, tomando en este caso una muestra de aire ultrapuro con el mismo equipamiento y tren de muestreo que el empleado en la toma de muestras. Para la realización de blancos con la cámara de flujo, ésta se apoyará sobre una superficie limpia de PTFE.

Los resultados obtenidos, idealmente, deberían ser inferiores a los límites de cuantificación analíticos, aunque en el muestreo de suelos, por las características de las baterías de perforación metálicas y la dificultad en su absoluta limpieza, no es descartable que se registren algunas trazas de contaminantes.



Estas trazas no obstante no deben diferir significativamente de los límites de cuantificación analíticos, y en todo caso deben ser muy inferiores a los valores límite normativos o los valores de referencia empleados en la inspección, de manera que la evaluación de conformidad de las muestras no pueda quedar en entredicho por una posible contaminación cruzada.

Caso de registrarse valores del blanco superiores al límite de cuantificación, se comprobará si la evaluación de la no conformidad de algunas de las muestras de la inspección pudiera variar de sentido de restar a su concentración el resultado del blanco, en cuyo caso, sin variar la evaluación de conformidad realizada, se dejará constancia de esta fuente de incertidumbre a la hora de evaluar esos resultados.

En el caso del blanco de suelos efectuado con agua, la carga contaminante analizada en relación a la masa habitual de muestras de suelos tomadas, no debe ser significativa con respecto a los NGRs establecidos. Es decir, teniendo en cuenta el volumen de agua empleado en el enjuague del útil de muestreo y la concentración analítica detectada, es posible estimar la carga contaminante neta (en unidades de masa) arrastrada, y teniendo a su vez presente la masa de suelo aproximada contenida en los recipientes de muestreo, se puede deducir el efecto en unidades de concentración que se produciría en el caso desfavorable de que toda esa contaminación pudiera ser recogida en el testigo que forma parte de la muestra. Para el cálculo de la masa de muestra, se tomará en consideración el recipiente de muestreo de menor volumen de los empleados, y una densidad “tipo” del tipo de suelo existente (por defecto $1,7 \text{ gr/cm}^3$).

Se adjuntará en los informes de resultados, la identificación y los resultados analíticos obtenidos en estos controles.

11. USO Y CONTROL DE EQUIPOS

Para el muestreo de suelos y aguas subterráneas asociadas, es necesario disponer de los siguientes equipos:

- Detector de fotoionización portátil (PID).
- pHmetro – conductivímetro
- Sonda de hidronivel e interfase

Es altamente recomendable igualmente disponer de espectrómetro por fluorescencia de rayos X (XRF) para la determinación semicuantitativa de metales.



El muestreo de suelos sin hacer uso de PID o de espectrómetro XRF sería posible apoyándose únicamente en las evidencias visuales y organolépticas, pero no permitiría discernir con fiabilidad diferentes grados de afección dentro de la columna, ni siquiera identificar en el caso de los metales algunas concentraciones de interés.

Por tal motivo, en caso de no hacer uso de estos equipos, el número de muestras a tomar y ensayar en laboratorio dentro de cada perfil se incrementaría significativamente, de acuerdo a lo expresado en el apartado de selección de muestras en profundidad de este documento.

11.1 DETECTOR DE FOTOIONIZACIÓN (PID)

Este equipo se emplea para la determinación genérica de compuestos orgánicos volátiles en la fase gaseosa del suelo, y es una herramienta de utilidad en la selección de muestras en estudios de suelos potencialmente contaminados por este tipo de compuestos (hidrocarburos, disolventes, etc.).

El equipo ha de calibrarse diariamente (con cada uso) mediante la lectura del cero (aire limpio sin contaminar) y la lectura de al menos un gas patrón (normalmente isobutileno de 100 ó 1000 ppm) contenido en una botella presurizada. Los resultados obtenidos, genéricos, no específicos de un determinado compuesto, se miden en unidades (ppm) equivalentes del gas patrón empleado.

La calibración del equipo, una vez realizada, debe verificarse mediante la medida, en modo lectura de muestras, de alguna concentración del mismo gas patrón empleado en la calibración, preferentemente de otra botella y concentración diferente a la empleada en la calibración. Los resultados de la verificación deben evaluarse por la entidad en función de criterios lógicos de aceptación-rechazo, aceptándose normalmente hasta un 10% de desviación.

El procedimiento de medida habitualmente empleado consiste en la toma de una porción de suelo recién extraído de la perforación o dispuesto en la caja portatestigos, su introducción en una bolsa de cierre hermético, su desagregación, la espera de un tiempo dado para permitir la volatilización de los compuestos hacia la fase gaseosa de la bolsa, y la medida de ésta (medidas head space) mediante la apertura de un pequeño orificio en la bolsa, la introducción de la sonda de aspiración del equipo y anotando las lecturas obtenidas, normalmente los valores máximos en un cierto intervalo.

Se deben tomar muestras para lectura de PID cada vez que se alcance un nivel de profundidad de interés para el muestreo (evidencias organolépticas, franja de oscilación del freático), y en su defecto, a intervalos



regulares de profundidad. En cualquier caso, cada vez que se tome una muestra para medida con PID, se tomará una muestra reservada para análisis físico-químico.

Las bolsas deben identificarse en el momento de su llenado, y realizar las medidas respetando unos tiempos homogéneos de estabilización comunes de unas muestras a otras (normalmente entre 15 y 25 minutos según las fuentes).

Al finalizar el sondeo, en base a las lecturas del detector por fotoionización portátil (PID) disponibles, en conjunción con otros criterios (indicios visuales y organolépticos, sucesión litológica), se procederá a seleccionar las muestras a ensayar en laboratorio, que deberán haber sido recogidas previamente en los recipientes adecuados y conservadas bajo refrigeración desde el momento en que la muestra del detector por fotoionización portátil fue tomada.

Quedarán registros de las calibraciones y verificaciones, fecha y hora de su realización, gases patrón empleados, etc., así como de los resultados de cada medida realizada junto a su profundidad en cada perfil, en los correspondientes partes de perforación.

11.2 pHMETRO-CONDUCTIVÍMETRO

Este equipo se emplea para la determinación, mediante la estabilización de las medidas consecutivas realizadas, del punto final del desarrollo/purgado de un pozo, así como para la determinación del pH y conductividad “in situ” de las aguas subterráneas tomadas en los piezómetros.

El equipo ha de calibrarse diariamente (con cada uso) mediante la lectura de una o más soluciones patrón (dependiendo del equipo y el modelo) de concentración conocida (normalmente con trazabilidad a patrones del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST), habitualmente desde 1 a 10 Ud. para pH y 0,1 a 100 mS/cm para conductividad.

Se debe comprobar que los resultados de la calibración realizada son aceptables, en base a los valores que el equipo devuelva sobre el algoritmo de calibración realizado (pendiente de asimetría en pH, constante de celda en conductividad, etc.).

La calibración del equipo, una vez realizada, debe verificarse mediante la medida, en modo lectura de muestras, de alguna otra solución patrón. Es importante que estos patrones de verificación sean de diferente marca y/o concentración a los empleados en la calibración, con objeto de detectar calibraciones defectuosas a causa de un patrón de calibración deficiente o en mal estado. Los criterios de aceptación-



rechazo de las verificaciones de pH y conductividad deben ser acordes aproximadamente con los valores requeridos para la estabilización físico química.

En el uso de estos equipos es necesario controlar la antigüedad de las soluciones patrón con las que se está calibrando y verificando, ya que un período prolongado de uso, en las condiciones de trabajo en campo (altas temperaturas, humedad, insolación), pueden conducir a una solución patrón en mal estado, que ha perdido parcialmente sus características de tampón, y que por tanto no es adecuada para el uso que se pretende. Es necesario por tanto controlar en las alícuotas llevadas a campo la fecha de apertura y la caducidad estimada del material, diferente a la caducidad emitida por el fabricante, válida para el bote sin abrir y en condiciones óptimas de almacenamiento.

11.3 SONDA DE HIDRONIVEL E INTERFASE

Este equipo se emplea para la medida de la profundidad del nivel piezométrico y, si existe, el espesor aparente de fases libres no acuosas: fases líquidas menos densas que el agua (LNAPL) y fases líquidas más densas que el agua (DNAPL).

El equipo, en función de la naturaleza de la sustancia donde se introducen sus electrodos (agua o hidrocarburo por ejemplo), emite un pitido y una señal luminosa diferenciada (intermitente o continua). Este tipo de medidas está sujeto en ocasiones a fallos en la emisión de la señal acústica o luminosa, normalmente por una deficiente limpieza de sus electrodos.

Es conveniente por tanto que al menos en cada campaña (con cada uso) se verifique el correcto funcionamiento de las alarmas del equipo, mediante la inmersión de la sonda en una fase líquida (agua) y una fase libre sobrenadante simulada (por ejemplo aceite), y se proceda a la limpieza de los electrodos cada vez que se sumerja el equipo para tomar lecturas.

Las medidas en campo con este equipo, que dependen en gran parte de la agudeza visual del ojo humano sobre una escala milimétrica, deben ser confirmadas mediante la repetición de las lecturas al menos en un par de ocasiones consecutivas. Para determinar el espesor aparente de una fase menos densa que el agua, las medidas de la interfase aceite-agua deben realizarse siempre en sentido ascendente de la sonda para evitar el efecto del arrastre de aceite en los sensores.

Se debe registrar la cota que se toma como referencia para las lecturas de la cinta métrica (normalmente borde superior de la tubería piezométrica, o borde de la arqueta de cierre), que debe ser el mismo que el empleado en la georeferenciación de los puntos de muestreo, de manera que restando la profundidad



leída a la altitud determinada topográficamente, pueda conocerse la cota absoluta o relativa del nivel piezométrico en ese punto.

11.4 ESPECTRÓMETRO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Este equipo se emplea para la medida semicuantitativa de metales y elementos traza inorgánicos in situ. La exactitud de las medidas difiere dependiendo de los elementos en cuestión y del rango de concentración considerado, siendo normalmente elevada para As, Pb, Cu y Zn, que pueden ser empleados como elementos indicadores.

Estos equipos de medida vienen con una calibración configurada de fábrica y aplican determinados algoritmos no bien conocidos para la reducción o eliminación de interferencias, por lo que no es habitual realizar calibraciones internas periódicas.

Sí es posible normalmente llevar a cabo verificaciones de la exactitud del equipo a partir de la medida de materiales de referencia, así como de la reproducibilidad de las medidas mediante la repetición de medidas sobre las mismas muestras y el control de blancos, aplicando criterios de aceptación razonables.

Igualmente es fundamental llevar un control periódico de la concordancia de los valores obtenidos con el medidor (metales totales) y los valores aportados por los laboratorios (metales pseudototales). Estas muestras de confirmación deben mostrar una correlación mínima para que los resultados XRF para un metal determinado permitan su utilización como método de screening adecuado ($p > 0,7$ según EPA 6200).

En estudios sobre emplazamientos que involucren un importante número de pares de muestras XRF-laboratorio con los mismos efectos de matriz, es posible realizar una calibración específica del instrumento para dicho emplazamiento.

Para obtener una buena concordancia de los resultados in situ con las medidas realizadas por los laboratorios, es fundamental realizar una homogenización suficiente de las muestras y la retirada de las gravas más gruesas antes de proceder a la medida.

Las muestras son introducidas normalmente en bolsas de polietileno formando una pastilla de un determinado grosor, sobre la que se apoya la ventana de medida del equipo.

El uso de estos equipos requiere las correspondientes autorizaciones administrativas por parte del Consejo



de Seguridad Nuclear y el control de las radiaciones ionizantes dispersas.

12. REFERENCIAS

AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA. Departament de Medi Ambient i Habitatge. 2005. "Protocol: mostreig d'aigües subterrànies".

AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA. Departament de Medi Ambient i Habitatge. 2009. "Criteris d'aplicació dels valors genèrics per a la restauració d'aigües subterrànies en emplaçaments contaminants per fonts d'origen puntual".

API. 2001. "Risk-based methodologies for evaluating petroleum hydrocarbon impacts at oil and natural gas E&P sites". American Petroleum Institute (API) Publication nº 4709.

ASTM D5092-04 (2010). "Standard practice for design and installation of groundwater monitoring wells".

ASTM D5903-96 (2012). "Standard guide for planning and preparing for a groundwater sampling event".

ASTM D6452-99 (2012). "Standard guide for purging methods for wells used for ground-water quality investigations".

ASTM D4448-01 (2013). "Standard guide for sampling ground-water monitoring wells".

ASTM D5521M-13 (2013). "Standard practice for development of groundwater monitoring wells in granular aquifers".

ASTM D6311-98 (2014). "Standard guide for generation of environmental data related to waste management activities: selection and optimization of sampling design".

ASTM D4547-15 (2015). "Standard guide for sampling waste and soils for volatile organic compounds".

BART EKLUND. 1992. "Practical guidance for flux chamber measurements of fugitive volatile organic emission rates". Journal of the air & waste management association 42:12, 1583-1591.

BLOOM N.S., Preus E., Katon J., Hiltner M. 2002. "Selective extractions to assess the biogeochemically relevant fractionation of inorganic mercury in sediments and soils". Analytica Chimica Acta 479 (2003) 233-248.

CEA-ENAC-01 Rev. 16. 2016. "Criterios para la utilización de la marca ENAC o referencia a la condición de acreditado".

CIRCULAR SOBRE REMEDIACIÓN DEL SUELO. 2013. Ministerio de Infraestructura y Medio Ambiente de Holanda. (Government Gazette, no. 16675, de 27 de junio de 2013).

CITYCHLOR. 2013. "Soil-gas monitoring: soil-gas well designs and soil-gas sampling techniques".

CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO. (COMUNIDAD DE MADRID). 2004. "Guía de investigación de la calidad del suelo".



DECRETO 334/2012, de 17 de julio, por el que se regulan las entidades colaboradoras en materia de Calidad Ambiental en la Comunidad Autónoma de Andalucía. BOJA nº 143 de 23/07/2012.

DECRETO 18/2015, de 27 de enero, por el que se aprueba el reglamento que regula el régimen aplicable a los suelos contaminados. BOJA nº 38 de 25 de febrero de 2015

DECRETO 49/2015, de 30 de marzo, por el que se regula el régimen jurídico de los suelos contaminados en la Comunidad Autónoma de Extremadura. DOE nº64 de 6/04/2015.

EN ISO 19258:2011. "Calidad del suelo. Directrices para la determinación de los valores de fondo" (ISO 19258:2005).

EPA 570-9-75-001. 1976. "Manual of water well construction practices".

EPA 600/8-86-008. 1986. "Measurement of gaseous emission rates from land surfaces using an emission isolation flux chamber. User's guide".

EPA OSWER 540/R-95/141. 1995. Superfund Program. "Representative sampling guidance. Volume 1: soil".

EPA 540-S-95-504. 1996. Ground water issue. "Low-flow (minimal drawdown) ground-water sampling procedures".

EPA 510-R-04-002. 2004. "How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites".

EPA 3200. 2005. "Mercury species fractionation and quantification by microwave assisted extraction, selective solvent extraction and/or solid phase extraction".

EPA 6200. 2007. "Field portable x-ray fluorescence spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment".

EPA OSWER 9200.2-154. 2015. "OSWER Technical guide for assessing and mitigating the vapour intrusion pathway from subsurface vapor sources to indoor air".

EPA 510-R-15-001. 2015. "Technical guide for addressing petroleum vapor intrusion at leaking underground storage tank sites".

EPA SERAS SOP 2114. 1994. "Standard Operating Procedure. Photoionization Detector (PID) HNU".

EPA SERAS SOP 2042. 2001. "Standard Operating Procedure. Soil gas sampling".

EPA SERAS SOP 2048. 2001. "Standard Operating Procedure. Monitor well installation".

EPA SERAS SOP 2082. 2007. "Standard Operating Procedure. Construction and installation of permanent sub-slab soil gas wells".

EPA SERAS SOP 2043. 2013. "Standard Operating Procedure. Manual water level measurement".

EPA SERAS SOP 2007. 2015. "Standard Operating Procedure. Groundwater well sampling".

EPA SERAS SOP 2044. 2015. "Standard Operating Procedure. Monitoring well development".

EPA SERAS SOP 1704. 2015. "Standard Operating Procedure. Summa canister sampling".



GEOSYNTEC consultants for Canadian Council of Ministers of the Environment. 2008. "Final scoping assessment of soil vapour monitoring protocols for evaluating subsurface vapour intrusion into indoor air".

IHOBE. Dpto. de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco. 2001. "Investigación de la contaminación del suelo. Guía metodológica. Toma de muestras."

IHOBE. Dpto. de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco. 2015. "Guía de excavaciones selectivas en el ámbito de los suelos contaminados".

INERIS-BARGE. 2010. "UBM procedure for the measurement of inorganic contaminant bioaccessibility from solid matrices"

ISO 10381-8 :2006. "Soil quality. Sampling. Part 8 : Guidance on sampling of stockpiles"

ISO 18512:2007. "Soil quality. Guidance on long and short term storage of soil samples".

ISO 5667-11:2009. "Water quality. Sampling. Part 11: Guidance on sampling of groundwaters".

ISO 5667-22:2010. "Water quality. Sampling. Part 22: Guidance on the design and installation of groundwater monitoring points".

ISO 22155:2011. "Soil quality – Gas chromatographic determination of volatile aromatic and halogenated hydrocarbons and selected ethers – Static headspace method".

ISO 5667-6:2014. "Water quality. Sampling. Part 6: Guidance on sampling of rivers and streams".

LEY 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. BOE nº 181 de 29 de julio de 2011.

MCMILEN S.J., MAGAW R.I., CAROVILLANO R.L. 2001. "Risk-based decision-making for assessing petroleum impacts at exploration and production sites".

MISSOURI DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES. 2005. "Missouri risk-based corrective action (MRBCA) for petroleum storage tanks. Soil gas sampling protocol".

NEW JERSEY DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION. 2013. Site Remediation Program. "Vapor intrusion technical guidance".

ORDEN de 23 de febrero de 2016, por la que se dispone la publicación de las determinaciones de contenido normativo del Plan Hidrológico de las Cuencas Mediterráneas andaluzas, aprobados por el Real Decreto 11/2016, de 8 de enero. BOJA nº 71, de 15 de abril de 2016.

ORDEN de 23 de febrero de 2016, por la que se dispone la publicación de las determinaciones de contenido normativo del Plan Hidrológico del Guadalete-Barbate, aprobados por el Real Decreto 11/2016, de 8 de enero. BOJA nº 72, de 18 de abril de 2016.

ORDEN de 23 de febrero de 2016, por la que se dispone la publicación de las determinaciones de contenido normativo del Plan Hidrológico del Tinto, Odiel y Piedras, aprobados por el Real Decreto 11/2016, de 8 de enero. BOJA nº 72, de 18 de abril de 2016.

REAL DECRETO 9/2005, de 14 de enero, por la que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados. BOE nº 15, de 18 de enero de 2005



REAL DECRETO 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. BOE nº 25, de 29 de enero de 2011.

REAL DECRETO 1514/2009, de 2 de octubre, por el que se regula la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro. BOE nº 255, de 22 de octubre de 2009

REAL DECRETO 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental. BOE Nº 219, de 12 de septiembre de 2015.

REAL DECRETO 1/2016, de 8 de enero, por el que se aprueba la revisión de los Planes Hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Occidental, Guadalquivir, Ceuta, Melilla, Segura y Júcar, y de la parte española de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Oriental, Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana y Ebro. BOE Nº 16, de 19 de enero de 2016.

THE CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1995. "Monitoring well design and construction for hydrogeologic characterization. Guidance manual for ground water investigations".

UNE-ISO 14507:2004. "Calidad del suelo. Pretratamiento de muestras para la determinación de contaminantes orgánicos".

UNE-ISO 10381-1:2007. "Calidad del suelo. Muestreo. Parte 1: Directrices para el diseño de los programas de muestreo".

UNE-ISO 10381-2:2007. "Calidad del suelo. Muestreo. Parte 2: Directrices sobre técnicas de muestreo."

UNE-EN ISO/IEC 17025:2005. "Evaluación de la conformidad. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración".

UNE-CEN/TR 15310-2 IN:2008. "Caracterización de residuos. Muestreo de residuos. Parte 2: Orientación en técnicas de muestreo".

UNE-ISO 10381-5:2010. "Calidad del suelo. Muestreo. Parte 5: Líneas directrices para el estudio de suelos contaminados en emplazamientos industriales y urbanos".

UNE-ISO 10381-7:2010. "Calidad del suelo. Muestreo. Parte 7: Líneas directrices para el muestreo del gas del suelo".

UNE-EN ISO 15175:2011. "Calidad del suelo. Caracterización de suelos en relación con la protección de las aguas subterráneas".

UNE-EN ISO/IEC 17020:2012. "Evaluación de la conformidad. Requisitos para el funcionamiento de diferentes tipos de organismos que realizan la inspección".

UNE-EN ISO 5667-3:2013. "Calidad del agua. Muestreo. Parte 3: Conservación y manipulación de las muestras de agua".

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA. 2013. "Niveles Genéricos de Referencia (NGRs) para metil terbutil eter (MTBE) y etil terbutil eter (ETBE) en suelos".



WILSON J.T., WEAVER J.W., WHITE H. 2012. EPA Groundwater issue: “An approach for developing site-specific lateral and vertical inclusion zones within which structures should be evaluated for petroleum vapor intrusion due to releases of motor fuel from underground storage tanks”.



ANEXO: CASO PRÁCTICO DE DISEÑO DE MUESTREO



El objetivo del presente anexo es plantear un caso práctico de diseño de muestreo de una caracterización de suelos y aguas subterráneas asociadas, tanto en fase exploratoria, como detallada, con el cual se puedan asimilar más fácilmente las indicaciones realizadas al efecto en apartados anteriores del documento.

Se parte de una instalación industrial actualmente en actividad, concretamente una cementera, para la cual se diseñan dos planes de muestreo, uno a llevar a cabo en la actual fase de explotación, y otro en un futuro escenario de clausura de la actividad.

En el escenario de clausura se ha planificado un cambio de uso de los terrenos, de industrial a urbano, y se va a presuponer la existencia de riesgos superiores a los permitidos en el análisis exploratorio llevado a cabo sobre dos de las zonas del emplazamiento, haciéndose necesaria una investigación de detalle en dichas zonas.

A.1 Características del emplazamiento contemplado

El emplazamiento es una cementera que ocupa una superficie total de 16 Ha, y que emplea coque para la alimentación del horno así como residuos líquidos de alto poder calorífico (fundamentalmente disolventes y aceites usados). También hace uso de fuel para los arranques del sistema, y dispone de gasóleo para la alimentación de los vehículos y la maquinaria de la instalación.

Se diferencian en la instalación las siguientes zonas:

- Parque de almacenamiento y trituración de calizas y margas
- Parque de almacenamiento y trituración de minerales metálicos.
- Parque de almacenamiento y trituración de coque.
- Parque de almacenamiento de escorias.
- Parque de almacenamiento de yesos.
- Depósitos de fuel (2) aéreos de gran tamaño, dentro de cubeto y cuarto de bombas anexo.
- Depósitos de gasoil (2) subterráneos con isleta de surtidores.
- Depósitos (2) de clinker
- Depósitos (8) de residuos líquidos de alto poder calorífico (disolventes y aceites usados fundamentalmente), aéreos, dentro de cubeto.
- Sala de bombeo, bajo nivel del suelo, de los residuos líquidos.
- Estación de tratamiento de aguas residuales, la cual trata las aguas consumidas en el proceso,



las aguas pluviales y de baldeo de la instalación, incluyendo la de las zonas más sensibles (cubetos, sala de bombas, área de manipulación de disolventes y aceites, etc.), más algunas de las aguas sanitarias.

- Taller mecánico
- Almacén de productos químicos y residuos peligrosos.
- Depósitos de agua (2) del sistema contraincendios
- Zonas de proceso (4)
- Almacén general
- Oficinas y aparcamientos
- Jardines
- Campas (2) sin uso aparente en la actualidad, pero que han servido históricamente para el acopio de algunos materiales, aunque no tienen por qué ser contaminantes, según se desprende del estudio de las fotografías multitemporales.
- Red de viales de la instalación, pavimentados desde el inicio de la actividad.

El fuel y los disolventes y aceites son transportados hasta una de las áreas de proceso mediante tuberías subterráneas. El coque y el resto de materias primas son transportados mediante cintas transportadoras sobre terrenos pavimentados desde el origen de la instalación.

Existe un sistema de saneamiento con dos ramales principales que evacúa las aguas residuales y pluviales hacia la estación de tratamiento. Dicho saneamiento se podría considerar como foco de riesgo a partir del punto en que recogen las aguas procedentes de las áreas más sensibles (suministro de gasoil, área de disolventes y aceites y área de fuel).

La salida de la ETAR, junto con las aguas sanitarias de las oficinas, son vertidas al alcantarillado público en los límites de la parcela.

El medio físico en el que se localiza la instalación está caracterizado a grandes rasgos por una litología de gravas y arenas con pocos finos propias del aluvial de una rambla, de elevada permeabilidad, formando un acuífero local con un nivel piezométrico libre que debe estar a unos 3,5 m de profundidad aproximadamente (medida realizada en pozo cercano), y una dirección de flujo subterráneo estimado en sentido Este-Oeste. Este acuífero aluvial descansa sobre un macizo calcarenítico de importante espesor, con el que estará en conexión hidráulica.



A.2 Plan de muestreo exploratorio completo (clausura)

La catalogación de estas zonas desde el punto de vista de la posible afección existente se puede observar en la siguiente tabla, en la que se incluye la superficie o longitud ocupada por las mismas, y el número de PDMs que habría disponer sobre ellas para llevar a cabo una caracterización exploratoria completa de la instalación en el supuesto de su clausura.

Tabla 13: Caso práctico: zonificación y justificación de PDMs en muestreo exploratorio completo (clausura)

Área / Foco	Area (Ha)	Longitud (m)	Origen afección	Plan muestreo para clausura	
				PDMs clausura	PZM clausura
Cubeto depósitos aéreos fuel	0,2220		Conocido	3	2
Parque de yesos	0,5941		Sin indicios	-	-
Parque de escorias	0,2049		Conocido	3	1
Campa 1	0,1989		Sin indicios	1	-
Cubeto depósitos disolventes y aceites usados	0,1163		Conocido	8	4
Taller mecánico	0,2165		Conocido	3	1
Campa 2	0,2061		Sin indicios	1	-
Almacén químicos y RRPP	0,0592		Conocido	2	-
Parque coque	0,3788		Conocido	3	1
Parque minerales metálicos	0,8029		Conocido	4	1
Parque calizas y margas	0,8475		Sin indicios	-	-
Estación tratamiento aguas	0,1600		Conocido	3	1
Oficinas	0,2402		Sin riesgo	-	-
Almacén general	0,2321		Sin riesgo	-	-
Área depósitos clinker	0,6661		Sin indicios	-	-
Zona de proceso 1	0,5687		Difuso	4	-
Zona de proceso 2	0,2580		Difuso	3	1
Zona de proceso 3	0,0524		Difuso	2	-
Zona de proceso 4	0,4205		Difuso	4	-
Zona de bombas	0,0346		Conocido	1	1
Depósitos enterrados gasoil y surtidores	0,0012		Conocido	3	2
Tubería depósitos fuel - Horno		117	Conocido	2	1
Tubería depósitos disolvente/aceites - Horno		95	Conocido	2	1
Saneamiento área gasoil y disolventes - ETAR		320	Conocido	3	-
Saneamiento area fuel - ETAR		190	Conocido	3	-
Zonas comunes	9,32		Sin indicios	-	-

PDM: Puntos de muestreo totales a contemplar



PZM: Puntos de muestreo, dentro del número total, en los que se instalarían piezómetros

En las oficinas y el almacén general se considera que no existe riesgo de afección al suelo por sustancias contaminantes. Los parques de almacenamiento de calizas y margas y yesos, así como la zona de almacenamiento del producto terminado (clinker), tampoco se consideran problemáticas, ya que se han dedicado desde el inicio de la actividad a la misma finalidad, y aunque no existe constancia de que los parques estuvieran pavimentados en todo momento, tampoco podrían haber causado una lixiviación de contaminantes.

La dos campas tampoco se considera que puedan ser problemáticas, ya que parece que han permanecido sin actividad la mayor parte del tiempo, aunque el estudio de la fotografía aérea multitemporal no ha podido ser concluyente respecto a posibles usos esporádicos, por lo que se que se han catalogado como zonas de bajo riesgo y se llevará a cabo un muestreo puntual sobre las mismas.

Los viales pavimentados y los jardines existen tal cual desde el inicio de la actividad, por lo que tampoco serán considerados en el muestreo.

Todos los depósitos de sustancias potencialmente contaminantes (gasoil, disolventes, aceites y fuel), bien sean en superficie o enterrados, serán muestreados al constituir focos localizados de posible afección. Se dispondrá para ello un PDM por cada depósito, ubicado sobre la plana de terreno ocupada por el mismo, en posición ligeramente desplazada en el sentido del flujo subterráneo, que es aproximadamente de Oeste a Este.

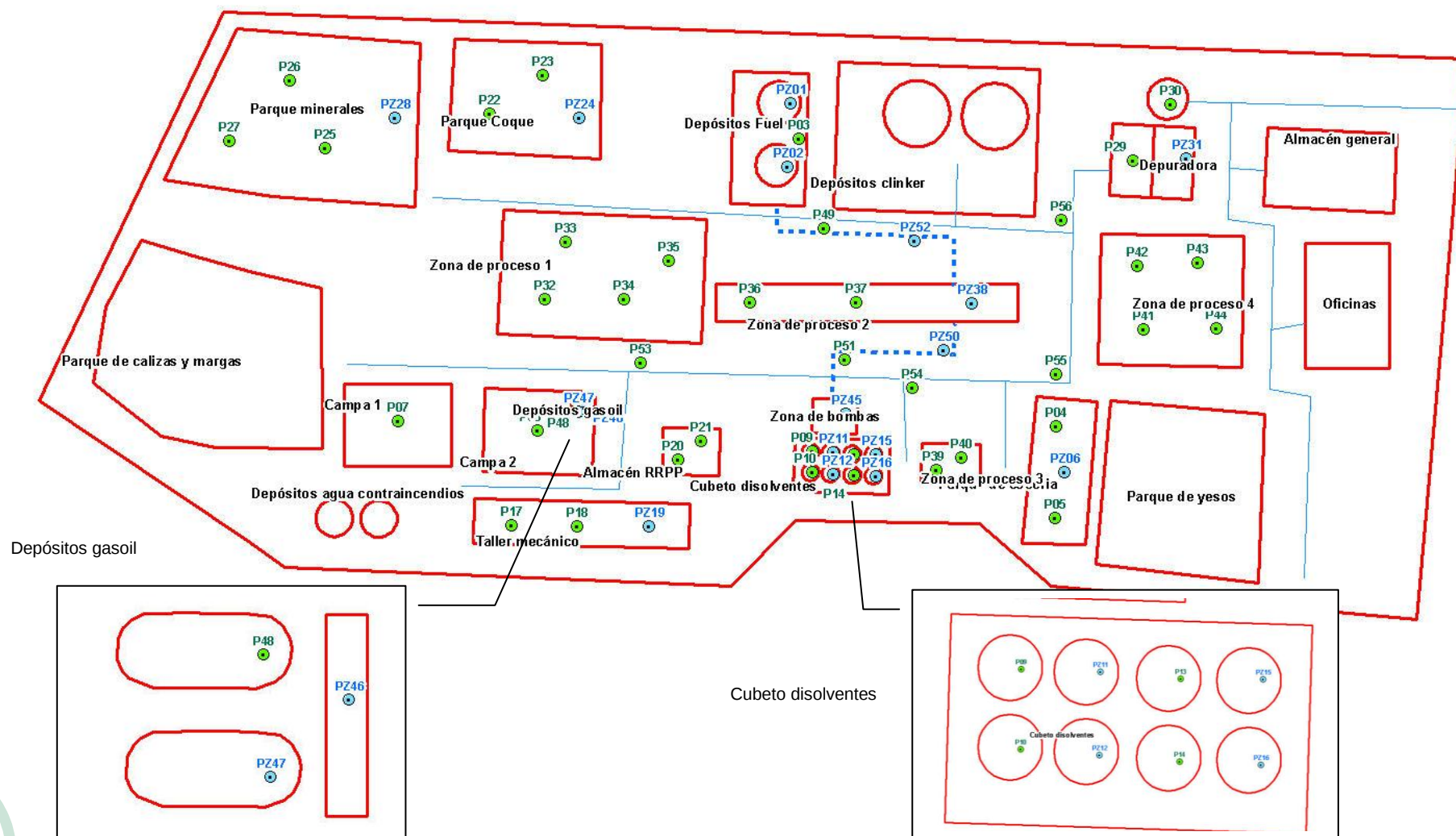
Cuando los depósitos van instalados dentro de cubeto, se ha considerado igualmente la superficie del mismo como posible área de afección, disponiendo en algún caso (cubeto de fuel) algún PDM adicional en dicha área, si el número de PDMs asociados a los depósitos es inferior al contemplado para zonas de contaminación difusa de ese tamaño.

También se ha considerado como foco localizado el área de surtidores anexa a los depósitos de gasoil.

Los parques de almacenamiento de sustancias que en mayor o menor grado pudieran afectar o haber afectado en el pasado (p.ej. sin pavimentación) al suelo (minerales, coque, escorias), son tratados igualmente como focos conocidos de posible afección, además de otras áreas de la instalación en las que se considera que el riesgo de afección es elevado (zona de bombas y ETAR). Estas áreas serán muestreadas de manera proporcional conforme a su tamaño, adoptando la misma densidad de muestreo que la establecida en la tabla de PDMs para zonas de contaminación difusa en investigación exploratoria.



Figura 13: Caso práctico: diseño del muestreo exploratorio completo (clausura de la actividad)



Las zonas de proceso de esta actividad, tanto de la actividad principal como de actividades auxiliares (taller, almacén químico), no se consideran especialmente problemáticas, aunque nunca es descartable la presencia de afección bajo ellas, por lo que serán tratadas como zonas de posible afección difusa, estableciendo una malla de muestreo proporcional a su superficie empleando el mismo criterio anterior, tratando de ubicar dichos PDMs en zonas en las que las vías de migración sean más factibles (fosos, arquetas y canalizaciones subterráneas de drenaje de derrames, etc.).

De entre estas la que se considera de mayor riesgo es la zona 4 en la que se manipula y se queman los combustibles empleados (fuel, disolventes y aceites). Estos combustibles son transportados hasta la misma desde sus respectivos almacenamientos a partir de canalizaciones subterráneas, en cuyo recorrido se han dispuesto diferentes PDMs espaciados entre sí una distancia acorde a los criterios contemplados en este documento en función de su longitud.

Otro elemento lineal de posible afección lo constituye la red de saneamiento de la instalación, en cuyo recorrido se han dispuesto igualmente PDMs en función de su longitud, considerando únicamente los tramos en que dichas canalizaciones pueden transportar derrames y arrastres de sustancias peligrosas; desde el área de los depósitos de gasoil en el ramal sur, y desde el cubeto de fuel en el ramal norte. Se ha prestado especial atención en el diseño a los pozos de registro de dicho saneamiento.

De todos los PDMs adoptados, 58 en total, se han seleccionado 17 ubicaciones en la que instalar piezómetros para el muestreo de las aguas subterráneas.

Dichas ubicaciones obedecen a los siguientes criterios:

- 1 piezómetro sobre la planta de cada depósito susceptible de provocar afección, salvo en el cubeto de disolventes/aceites, en que dada la cercanía entre los mismos, se ha dispuesto 1 piezómetro por cada dos depósitos alineados en dirección W-E (dirección del flujo subterráneo).
- 1 piezómetro en zona de aguas abajo (hacia el E) en cada uno de los parques de almacenamiento de graneles susceptibles de lixiviar con las aguas de lluvia (minerales y coque fundamentalmente, y como medida conservadora también en el de escorias).
- 1 piezómetro aguas abajo en la zona de proceso 4 donde se manipulan combustibles líquidos, así como en la Estación de tratamiento de aguas, en la zona de bombas y en el taller mecánico, donde se manipulan sustancias líquidas posiblemente contaminantes.
- 1 piezómetro aguas abajo del recorrido de las tuberías subterráneas de fuel.



En zonas sin pavimentar, sin focos de posible afección subterráneos y sin manipulación de hidrocarburos líquidos que puedan dar origen a una fase libre ligera (LNAPL) u otros contaminantes líquidos, esto es en los parques de minerales, escorias y coque y las dos campas, las perforaciones se realizarán mediante cata hasta una profundidad de aproximadamente 2m, suficiente para atravesar los rellenos antrópicos y avanzar algún metro en terreno natural.

En el resto de casos, bien por la existencia de pavimentación superficial, porque se trata de PDMs en los que hay que instalar piezómetro o porque son zonas en las que podría darse una percolación de contaminantes líquidos hasta el nivel freático, se procede a realizar las perforaciones necesarias mediante sondeo mecánico a rotación. En estas perforaciones se alcanzará una profundidad aproximada de 4 m, suficiente para alcanzar el nivel freático, continuando si fuera preciso en función de las evidencias organolépticas encontradas. En aquellos casos en que se instala piezómetro se prolongará un par de metros adicionales (6 m) para disponer de un par de metros de columna saturada aproximadamente.

En el cubeto de residuos orgánicos (fundamentalmente disolventes), al menos uno de los PDMs planteados se perforará a mayor profundidad (15 m aprox.), procurando alcanzar la base del acuífero aluvial constituido por calcarenitas igualmente acuíferas. El objetivo es detectar un posible nivel algo más impermeable en el aluvial (p.ej. unas arcillas o limos en la base o en un nivel intermedio del aluvial) que pudiera favorecer la formación de una fase libre densa (DNAPL). Una vez alcanzadas las calcarenitas se considera que la probabilidad de encontrar este nivel impermeable con continuidad son más remotas.

Las sustancias contaminantes posiblemente presentes en cada una de las zonas investigadas, así como las analíticas seleccionadas en consecuencia, se resumen en la siguiente tabla:



Tabla 14: Caso práctico: justificación de analíticas en muestreo exploratorio completo (clausura)

Área / Foco	Sustancias contaminantes manipuladas	Parámetros analíticos planteados
Cubeto depósitos aéreos fuel	Fuel, gasoil	TPH C5-C40 TPH Escisión alifáticos/aromáticos BTEX HAPs
Tubería depósitos fuel – Horno		
Saneamiento área fuel – ETAR		
Depósitos enterrados gasoil y surtidores		
Saneamiento área gasoil y disolventes – ETAR		
Cubeto depósitos disolventes y aceites usados	Disolventes agotados con restos de pinturas, hidrocarburos, etc Aceites usados	TPH C5-C40 TPH Escisión alifáticos/aromáticos Anexo V RD 9/05 Metales
Zona de bombas		
Tubería depósitos disolvente/aceites – Horno		
Parque coque	Hidrocarburos Metales	TPH C10-C40+ TPH Escisión alifáticos/aromáticos (50%) PAHs Metales
Parque de escorias	Metales	Metales
Parque minerales metálicos		
Zona de proceso 1	Aceites lubricantes Metales	TPH C10-C40 TPH Escisión alifáticos/aromáticos (50%) PAHs Metales
Zona de proceso 3		
Zona de proceso 4		
Zona de proceso 2	Fuel Coque Disolventes agotados Aceites lubricantes Metales	TPH C5-C40+ TPH Escisión alifáticos/aromáticos (50%) Anexo V RD 9/05 Metales
Taller mecánico	Aceites usados Disolventes Taladrinas	
Almacén químicos y RRPP	Ácidos y bases Envases, aceites, baterías, otros residuos	TPH C10-C40 TPH Escisión alifáticos/aromáticos (50%) Anexo V RD 9/05 Metales
Estación tratamiento aguas	Aguas hidrocarbonadas	
Campa 1	Desconocidos	
Campa 2		

En las áreas relacionadas con los tres focos que se consideran más problemáticos y de mayor riesgo (fuel, gasoil y disolventes/aceites), se llevará a cabo una escisión de hidrocarburos en todas las muestras tomadas. En el resto de las zonas dicho fraccionamiento se llevará a cabo sobre la mitad de las muestras aproximadamente, seleccionando aquellas que presenten mayores evidencias organolépticas.

Junto con el fraccionamiento alifáticos/aromáticos también se llevará a cabo la determinación de



trimetilbencenos, metilnaftalenos e isopropilbenceno, y de hexano (en caso de analizar C5-C40), con objeto de poder afinar la cuantificación de los riesgos por estas fracciones.

Salvo en aquellos casos en los que los únicos hidrocarburos manipulados sean aceites minerales, se llevará a cabo una cuantificación de las cadenas volátiles (C5-C10) y extraíbles (C10-C40) de hidrocarburos. En aquellas áreas en las que se haya manipulado coque, se ha previsto con el laboratorio la cuantificación de cadenas más pesadas que C35/40 si es que éstas son detectadas.

En las zonas en las que además de los compuestos hidrocarbureados del petróleo, se deban analizar compuestos orgánicos clorados por el uso de disolventes, se llevará a cabo un paquete analítico completo del Anexo V del RD 9/2005 pues supone igual o menor coste económico.

El número de muestras a tomar en cada perfil, teniendo en cuenta los criterios establecidos en el documento, y disponiendo tanto de equipo PID como XRF para la medida in situ orientativa de volátiles y metales, se presupone que podría ser el siguiente según el grado de afección que a priori se estima en cada zona y de la movilidad de las sustancias contaminantes involucradas:

Tabla 15: Caso práctico: previsión de muestras por perfil

Áreas investigadas	Nº Muestras de suelo por perfil	Justificación
Cubeto de fuel Cubeto disolventes/aceites Depósitos gasoil Zona de proceso 2	2-3	Se estima bastante probable la existencia de algún tipo de afección en los primeros centímetros de suelo bajo solera por infiltración de fugas en la base de los depósitos, derrames en el cubeto, etc siendo en ese caso procedente la toma de una segunda muestra de cierre a mayor profundidad. Igualmente probable la existencia de afección en la zona capilar sobre el freático o en los primeros centímetros de zona saturada.
Resto zonas de proceso Taller mecánico Parques de coque y minerales Tuberías subterráneas y saneamientos	1-2	Es probable la existencia de afección superficial o a nivel de las estructuras subterráneas, y de que ésta en algunos casos pueda extenderse algunos centímetros o metros en profundidad, necesitando en ese caso una segunda muestra. Es menos probable una afección sobre el freático.
Parque de escorias Almacén químico y RRPP Estación tratamiento aguas residuales Campas	1	Se estima un potencial de afección bajo y muy limitado en profundidad, de manera que las muestras a tomar estarán normalmente bajo los valores normativos o muy próximos a ellos, no siendo necesario tomar una segunda muestra.

En función de las medidas in situ obtenidas y de las evidencias organolépticas existentes, se deberá reducir o ampliar el número de muestras a tomar.



No en todas las muestras se ha de aplicar tampoco la misma batería analítica. La analítica de metales, fundamentalmente, podría obviarse en el alguna/s de las muestras de profundidad del perfil en función de los resultados in situ. Por el contrario, la analítica de orgánicos, si no existen focos de posible afección en superficie (p.ej. depósitos y tuberías enterrados) y no existen medidas in situ ni evidencias organolépticas significativas en los niveles superficiales, podría ser sólo necesaria en profundidades intermedias o en la zona capilar sobre el freático.

Adicionalmente se tomarían muestras de 15 de los PDMs considerados para ensayos de granulometría, pH y C.O., repartidas por las diferentes zonas, prestando especial atención en estos dos últimos parámetros al parque de minerales, de coque y de escorias, en los cuales se tomará un par de muestras en cada una de ellas.

En 4 de los piezómetros instalados, donde menos afección se detecte visualmente, y a ser posible repartidos más o menos uniformemente por el emplazamiento, se llevarán a cabo ensayos de bombeo/recuperación para la estimación de la conductividad hidráulica de la zona saturada.

A.3 Plan de muestreo exploratorio en fase de actividad

Durante la fase de actividad se llevaría a cabo un diseño de muestreo que, partiendo del diseño completo para la clausura, tendría en cuenta que:

- Muchos de los PDMs se desplazarían ligeramente aguas abajo, ya que no sería factible muestrear sobre el espacio físico ocupado por los focos de afección.
- Se eliminarían aquellos PDMs para los que el acceso sea imposible o bien muy complicado, salvo que en este último caso existan evidencias de que se está produciendo afección a los suelos y/o a las aguas subterráneas.

En el caso práctico que nos ocupa, se podrían eliminar (más bien posponer) los PDMs asociados a las áreas de proceso, taller mecánico, y almacén químico.

Todos los PDMs asociados a depósitos o focos puntuales se desplazarían unos metros hacia el este. En el caso del cubeto de disolventes, ya que todos están alineados en dos hileras en el sentido del flujo subterráneo, sería suficiente con ubicar 2 PDMs con piezómetro en el exterior del cubeto, aguas abajo del mismo.



Los PDMs que se podrían ejecutar en fase de actividad serían los que figuran en las siguientes tabla y figura.

Tabla 16: Caso práctico: zonificación y justificación de PDMs en muestreo exploratorio en fase de actividad

Área / Foco	Area (Ha)	Longitud (m)	Origen afección	Plan muestreo durante actividad	
				PDMs en uso	PZM en uso
Cubeto depósitos aéreos fuel	0,2220		Conocido	2	2
Parque de yesos	0,5941		Sin indicios	-	-
Parque de escorias	0,2049		Conocido	3	1
Campa	0,1989		Sin indicios	1	-
Cubeto depósitos disolventes y aceites usados	0,1163		Conocido	2	2
Taller mecánico	0,2165		Conocido	-	-
Campa	0,2061		Sin indicios	1	-
Almacén químicos y RRPP	0,0592		Conocido	-	-
Parque coque	0,3788		Conocido	3	1
Parque minerales metálicos	0,8029		Conocido	4	1
Parque calizas y margas	0,8475		Sin indicios	-	-
Estación tratamiento aguas	0,1600		Conocido	1	1
Oficinas	0,2402		Sin riesgo	-	-
Almacén general	0,2321		Sin riesgo	-	-
Área depósitos clinker	0,6661		Sin indicios	-	-
Zona de proceso 1	0,5687		Difuso	-	-
Zona de proceso 2	0,2580		Difuso	-	-
Zona de proceso 3	0,0524		Difuso	-	-
Zona de proceso 4	0,4205		Difuso	-	-
Zona de bombas	0,0346		Conocido	1	1
Depósitos enterrados gasoil y surtidores	0,0012		Conocido	2	2
Tubería depósitos fuel - Horno		117	Conocido	2	1
Tubería depósitos disolvente/aceites - Horno		95	Conocido	2	1
Saneamiento área gasoil y disolventes - ETAR		320	Conocido	3	-
Saneamiento area fuel - ETAR		190	Conocido	1	-
Zonas comunes	9,32		Sin indicios	-	-

PDM: Puntos de muestreo totales a contemplar

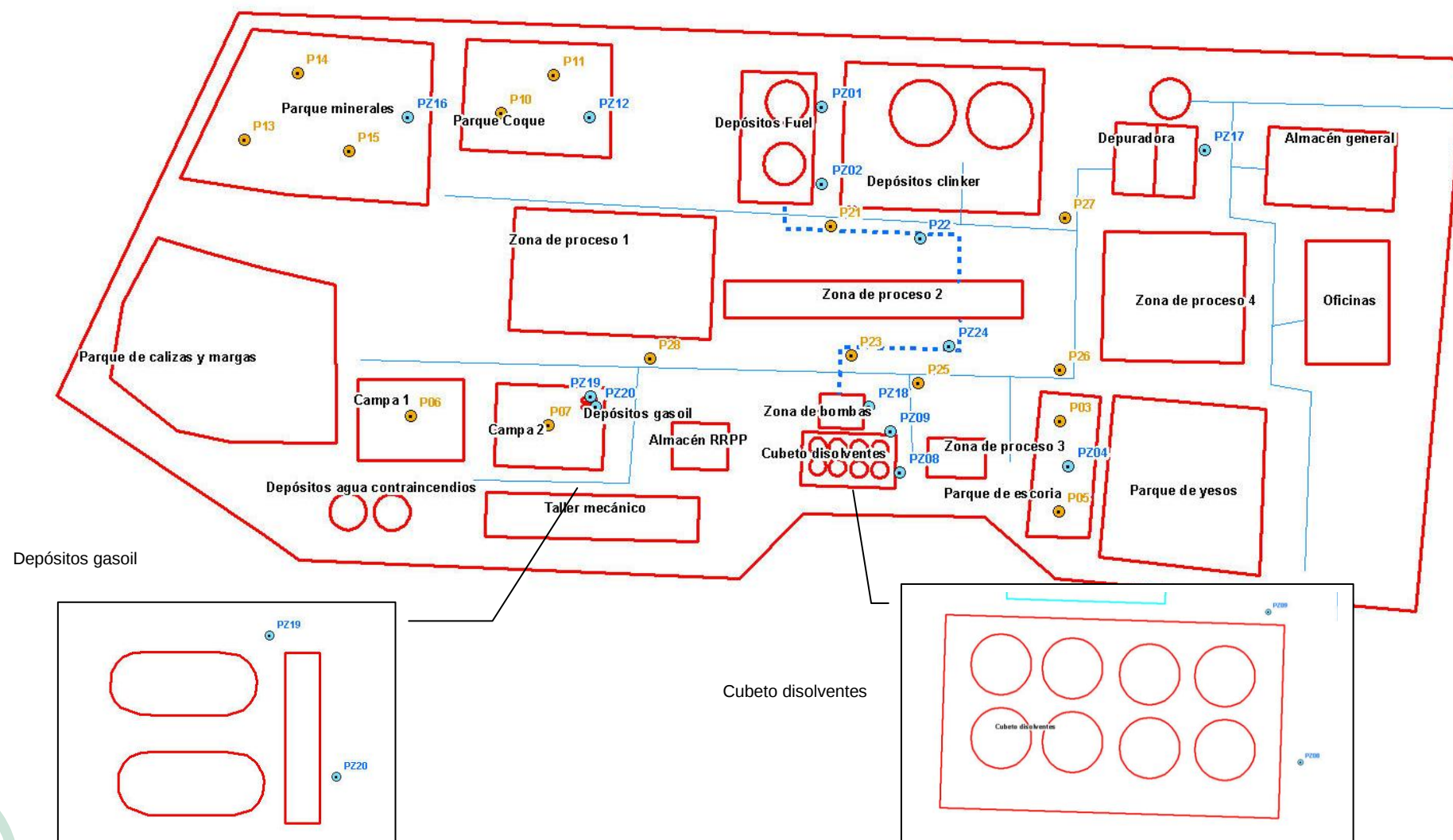
PZM: Puntos de muestreo, dentro del número total, en los que se instalarían piezómetros

Si los PDMs ubicados exteriormente a los cubetos de fuel y de disolventes denotaran la existencia de afección significativa, sería preciso no obstante ampliar la caracterización retomando la posición idónea de los PDMs dentro del cubeto, si es que fuera físicamente posible colocar en su interior una máquina de sondeos.





Figura 14: Caso práctico: diseño del muestreo exploratorio en fase de actividad de la instalación



A.4 Plan de muestreo de detalle ante un cambio de uso

Si posteriormente a la clausura de la actividad está prevista la recalificación del uso del suelo a urbano, y se detecta en la investigación exploratoria completa la existencia de riesgos superiores a los permitidos para el nuevo uso a considerar, es necesario llevar a cabo una investigación de detalle en dichas áreas.

En el caso práctico se han contemplado tres áreas con riesgo:

- Parque de minerales (riesgos por contacto directo)
- Cubeto de fuel (riesgos por contacto directo e inhalación)
- Cubeto de disolventes (riesgos por contacto directo e inhalación)

En el área de disolventes, la densidad de muestreo previa disponible (tras el muestreo exploratorio durante la actividad y tras la clausura), tanto para suelos como para aguas subterráneas, es adecuada para una investigación de detalle en un área de ese tamaño, por lo que en principio la información ya disponible podría ser suficiente, a menos que se necesite algún PDM perimetral adicional a los ya contemplados para delimitar el alcance de la afección en alguna dirección.

En el caso del parque de minerales, sobre el mismo hay proyectada una reparcelación del terreno para la construcción de viviendas unifamiliares, que debe ser tenida en cuenta en la investigación de detalle, proyectando los PDMs adicionales necesarios para disponer al menos de un PDM por parcela. Además, para un área de unos 0,8 Ha, necesitamos disponer de un mínimo de unos 13 PDMs. Al no detectarse riesgos a través de las aguas subterráneas no hemos de ampliar la red piezométrica en esa área. Los nuevos PDMs a ejecutar (10) se llevarán a cabo mediante cata hasta alcanzar 0,5 m en terreno natural no afectado.

Se tomarán igualmente 2 muestras por perfil, y en cuanto a la batería analítica, en la exploratoria se llevó a cabo un barrido de 16 metales, que puede reducirse a 4-5 para los que se obtienen valores de riesgo tóxico mayores a 0,1 y cancerígenos mayores a 10^{-6} , y que son los que en la práctica contribuyen a la obtención de riesgos acumulados superiores a los permitidos.

En aproximadamente un 25% de los nuevos PDMs a ejecutar, y para aquellas muestras en las que se obtengan mayores concentraciones in situ, se llevarán a cabo ensayos de bioaccesibilidad oral humana de estos metales, con objeto de ajustar la evaluación de riesgos en esta fase de detalle.



Sobre los resultados de estos nuevos PDMs se confirmará o no la existencia de riesgos, y en el primero de los supuestos, se evaluará si la afección es más o menos homogénea en toda la extensión del parque de minerales, o bien se detectan zonas más contaminadas con riesgos de otras menos afectadas sin ellos, en cuyo caso sería posible aumentar la malla de muestreo nuevamente para delimitar dichas áreas.

Figura 15: Caso práctico; diseño del muestreo detallado en parque de minerales sobre reparcelación urbana de viviendas



Sobre el cubeto de fuel, el proyecto urbanístico contempla una única parcela destinada a zonas verdes, que también incluye el cubeto de disolventes y gran parte de la zona este de la antigua instalación. En este caso contemplaremos ampliar la malla de muestreo en torno a los PDMs previos en los que se detectan riesgos, ubicando PDMs adicionales en las direcciones del espacio necesarias para conseguir delimitar la afección. La densidad resultante debería ser como mínimo de 9 PDMs para un área de 0,22 Ha, y al tratarse de una zona urbana la distancia entre PDMs debería estar comprendida entre los 10-15 m como máximo de acuerdo a las recomendaciones de la norma UNE-ISO 10381-2:2010.

Al detectarse riesgos por inhalación a partir de los suelos y las aguas subterráneas en la investigación exploratoria, parte de los nuevos PDMs a contemplar dentro del perímetro del cubeto serán acondicionados como piezómetros para delimitar la anchura de la pluma contaminante en las aguas.

Para delimitar la longitud de dicha pluma se plantean igualmente algunos piezómetros adicionales dispuestos de forma paralela al sentido del flujo subterráneo (hacia el este).

En total se llevarían a cabo 10 nuevas perforaciones mediante sondeo mecánico, instalando piezómetro en 5 de ellas. El número de muestras de suelo a tomar por perfil será nuevamente de 2-3 por perfil, salvo que las medidas in situ y la ausencia de evidencias organolépticas permitan reducir ese número conforme nos alejemos de los focos de afección. La batería analítica puede reducirse eliminando compuestos para los que en la investigación exploratoria se obtuvieron siempre resultados inferiores al límite de cuantificación o próximos a él (ej. BTEX, TPH C5-C10, etc), inclusive en las muestras más afectadas, sin suponer un aporte significativo a los riesgos acumulados ($<0,1$ para riesgos tóxicos y $<10^{-6}$ para riesgos cancerígenos).

En 4 de los piezómetros instalados, aquellos en los que se detecten mayores concentraciones de contaminantes, se llevará a cabo un muestreo y análisis de la fase gaseosa del suelo con objeto de reducir fuentes de incertidumbre y afinar los riesgos por inhalación de vapores en esta zona.



Figura 16: Caso práctico: diseño del muestreo detallado en cubeto de fuel sobre zona verde urbana

