



POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

CAMPUS
DE EXCELENCIA
INTERNACIONAL

E.T.S. DE
INGENIEROS DE
MINAS DE MADRID



UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS DE SONDEOS EN CAPTACIONES DE AGUA

DEPARTAMENTO DE EXPLOTACIÓN DE
RECURSOS MINERALES Y OBRAS
SUBTERRÁNEAS
LABORATORIO DE TECNOLOGÍAS
MINERAS

JUAN HERRERA HERBERT
JORGE CASTILLA GÓMEZ
MADRID, 2012

UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS DE SONDEOS EN CAPTACIONES DE AGUA

DEPARTAMENTO DE EXPLOTACIÓN DE
RECURSOS MINERALES Y OBRAS
SUBTERRÁNEAS
LABORATORIO DE TECNOLOGÍAS
MINERAS

JUAN HERRERA HERBERT
JORGE CASTILLA GÓMEZ
MADRID, 2012

Copyright © 2012. Todos los derechos reservados

Juan Herrera Herbert

juan.herrera@upm.es

Jorge Castilla Gómez

jorge.castilla@upm.es

Diseño de cubiertas e interiores: Los autores

Imagen de portada: Juan Herrera Herbert

Universidad Politécnica de Madrid

Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas

Laboratorio de Tecnologías Mineras

ADVERTENCIA

El presente documento ha sido preparado con una finalidad exclusivamente divulgativa y docente. Las referencias a productos, marcas, fabricantes y estándares que pueden aparecer en el texto, se enmarcan en esa finalidad y no tienen ningún propósito comercial.

Todas las ideas que aquí se desarrollan tienen un carácter general y formativo y el ámbito de utilización se circunscribe exclusivamente a la formación de los estudiantes de la UPM. La respuesta ante un caso particular requerirá siempre de un análisis específico para poder dictaminar la idoneidad de la solución, los riesgos afrontados en cada caso, además de las incidencias en los costes de explotación. Consulte siempre a su distribuidor y fabricante de confianza.

Índice de la obra

1. LA UTILIZACIÓN DE SONDEOS EN HIDROGEOLOGÍA Y CAPTACIÓN DE AGUAS	3
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. POZOS Y SONDEOS.....	4
2. TÉCNICAS UTILIZADAS PARA LA PERFORACIÓN DE SONDEOS DE INVESTIGACIÓN	11
1. LA INVESTIGACIÓN HIDROEOLÓGICA.....	11
1.1. RECOPIACIÓN DOCUMENTAL Y ESTUDIO DE LA INFORMACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLOGICA DISPONIBLE EN ORGANISMOS E INSTITUCIONES.....	12
1.2. RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLOGICO DE LA ZONA.....	15
1.3. ANÁLISIS HIDROGEOLOGICO DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA DEL ENTORNO.....	19
1.4. PROPUESTA DE REALIZACIÓN DE SONDEOS DE RECONOCIMIENTO.....	21
2. SISTEMAS DE PERFORACIÓN.....	21
3. ETAPAS CONSTRUCTIVAS.....	23
4. DATOS OBTENIDOS.....	24
3. ORGANIZACIÓN Y EJECUCIÓN DE UNA CAMPAÑA DE POZOS Y SONDEOS PARA AGUA	27
1. CRITERIOS DE DISEÑO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS SONDEOS.....	27
1.1. PROFUNDIDAD DE LA CAPTACIÓN.....	28
1.2. DIÁMETRO DEL SONDEO.....	29
1.3. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE PERFORACIÓN.....	33
1.4. RÉGIMEN DE PERFORACIÓN.....	35
1.5. CARGA SOBRE EL ÚTIL.....	36
1.6. VELOCIDAD DE ROTACIÓN.....	38
1.7. LÍQUIDO DE PERFORACIÓN.....	38
1.8. PERFORACIÓN CON AIRE.....	39
1.9. PERFORACIÓN CON LÍQUIDOS AIREADOS.....	40
1.10. INTERRELACIÓN ENTRE LOS COMPONENTES DEL RÉGIMEN DE PERFORACIÓN.....	41
1.11. OTROS ASPECTOS A CONSIDERAR EN LA FASE DE DISEÑO.....	42
2. INGENIERÍA DE LAS ETAPAS DE PROYECTO Y ASISTENCIA TÉCNICA A OBRA.....	44
2.1. ELABORACIÓN DEL PROYECTO CONSTRUCTIVO DE LA OBRA.....	45
2.2. GESTIÓN DE PERMISOS Y TRAMITACIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN.....	45
2.3. LA FIGURA DEL DIRECTOR TÉCNICO DE LA OBRA.....	46
2.4. EJECUCIÓN DE LAS OBRAS.....	46
2.5. EVALUACIÓN CUANTITATIVA, CUALITATIVA Y CONSTRUCTIVA DE LA OBRA.....	47
2.6. ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LAS OBRAS.....	47
2.7. INFORMES FINALES DE OBRA. "AS BUILT".....	48
4. PERFORACIÓN DE POZOS Y SONDEOS PARA CAPTACIÓN	49
1. CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE PERFORACIÓN.....	49
2. EXCAVACIÓN DE POZOS ABIERTOS.....	50
2.1. MÉTODO DE HÉLICE.....	51
2.2. SISTEMA DE CUCHARA BIVALVA.....	51
3. PERFORACIÓN DE POZOS CON TÉCNICAS DE SONDEO.....	52
3.1. UTILIZACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ROTACIÓN.....	52
3.2. UTILIZACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ROTOPERCUSIÓN.....	56
3.3. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE PERFORACIÓN.....	59

5. CONSTRUCCIÓN DE LOS SONDEOS DE CAPTACIÓN.....	63
1. INTRODUCCIÓN	63
2. SITUACIÓN DE LOS SONDEOS.....	63
3. PREPARACIÓN DE ACCESOS Y EMPLAZAMIENTO DE LOS EQUIPOS.....	65
4. VIGILANCIA Y CONTROL DE LA PERFORACIÓN	66
5. ENSAYOS IN SITU Y TOMA DE MUESTRAS.....	66
5.1. TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA	66
5.2. TOMA DE MUESTRAS Y ANÁLISIS QUÍMICOS	69
5.3. ENSAYOS DE BOMBEO	69
6. ACONDICIONAMIENTO	70
7. ENTUBACIÓN	71
7.1. ENTUBADOS PROVISIONALES.....	71
7.2. ENTUBACIÓN DE EMBOQUILLE	71
7.3. ENTUBADOS DEFINITIVOS.....	73
7.4. DIÁMETRO DE ENTUBADO DE LOS SONDEOS	75
7.5. SELECCIÓN DE LA TUBERÍA A EMPLEAR	76
7.6. REJILLA	78
7.7. COLOCACIÓN DE LA TUBERÍA EN EL POZO.....	82
8. ENGRAVILLADO.....	82
9. LIMPIEZA Y DESARROLLO	84
10. CONTROL CONSTRUCTIVO CON REGISTRO ÓPTICO.....	88
11. PROTECCIÓN SANITARIA Y DESINFECCIÓN.....	89
12. CIERRE, TERMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DEL ESPACIO AFECTADO	90
12.1. PROTECCIÓN CONTRA RETORNOS.....	90
12.2. RESTAURACIÓN DE TERRENOS.....	90
6. CONTROL DE CALIDAD DE LAS TOMAS DE MUESTRAS DE AGUA EN SONDEOS	91
1. REALIZACIÓN DEL MUESTREO.....	91
2. APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE PRESERVACIÓN.....	96
3. ANÁLISIS "IN SITU" DE CONSTITUYENTES INESTABLES	99
4. TRANSPORTE DE LAS MUESTRAS	100
5. DETERMINACIONES EN LABORATORIO	100
6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	105
7. ACTIVIDADES DE VIGILANCIA Y CONTROL DE LA OBRA.....	107
1. CONCEPCIÓN DE LA VIGILANCIA Y EL CONTROL DE OBRA	107
2. TRABAJOS SISTEMÁTICOS DE CONTROL	107
3. CONTROL DE LA EJECUCIÓN DE LA OBRA. INSPECCIÓN Y VIGILANCIA.....	108
4. EJEMPLO DE PARTE DIARIO DE CONTROL DE SONDEO	117
5. CONTROL DE MEDICIONES	120
6. CONTROL PRESUPUESTARIO.....	120
7. CONTROL DE PROGRAMACIÓN	120
8. CONTROL DE CALIDAD	121
9. PLAZOS DE EJECUCIÓN ORIENTATIVOS.....	121
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123

1. LA UTILIZACIÓN DE SONDEOS EN HIDROGEOLOGÍA Y CAPTACIÓN DE AGUAS

1. INTRODUCCIÓN

Se pueden definir los sondeos de agua subterránea como perforaciones que se realizan en el terreno con el objetivo de proceder a la captación de aguas en el subsuelo y/o a la investigación hidrogeológica.

En las últimas décadas, las necesidades de consumo han llevado a una gran demanda no solo en cuanto a disponibilidad de grandes cantidades de recursos, sino también en cuanto a gran calidad de estos recursos hídricos. Esto ha llevado a importante y destacado desarrollo de la perforación de nuevas y mejores captaciones de aguas subterráneas, así como a la expansión de redes de sondeos y piezómetros para la vigilancia y control de los acuíferos. Es por tanto una actividad en claro auge.

La perforación de sondeos para captación de agua o como elemento de las redes de control de los acuíferos, está sujeta a un conjunto de singularidades y especificaciones debidas precisamente a la imperiosa necesidad de garantizar la protección de los acuíferos y la pérdida de calidad en el agua como consecuencia de una posible deficiencia de cualquier tipo en la perforación o en la instalación.

El agua de una instalación de captación de agua para abastecimiento debe cumplir lo establecido en la legislación vigente sobre el agua para consumo humano. Por otro lado, las instalaciones se diseñan y dimensionan con arreglo a unos criterios que permitan cumplir las exigencias de caudal y presión establecidas por las compañías suministradoras.

Por todo ello, los materiales que se vayan a utilizar en la construcción de la instalación, en relación con su afectación al agua que suministren, deben ajustarse a los siguientes requisitos:

- No producir concentraciones de sustancias nocivas que excedan los valores permitidos por la normativa (en el caso de España, el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero).
- No modificar las características organolépticas ni la salubridad del agua suministrada.
- Ser resistentes a la corrosión interior.
- Ser capaces de funcionar eficazmente en las condiciones de servicio previstas.
- No deben presentar incompatibilidad electroquímica entre sí.
- Deben ser resistentes a temperaturas de hasta 40°C, y a las temperaturas exteriores de su entorno inmediato.
- Deben ser compatibles con el agua suministrada y no deben favorecer la migración de sustancias de los materiales en cantidades que sean un riesgo para la salubridad y limpieza del agua de consumo humano.
- Su envejecimiento, fatiga, durabilidad y las restantes características mecánicas, físicas o químicas, no deben disminuir la vida útil prevista de la instalación.

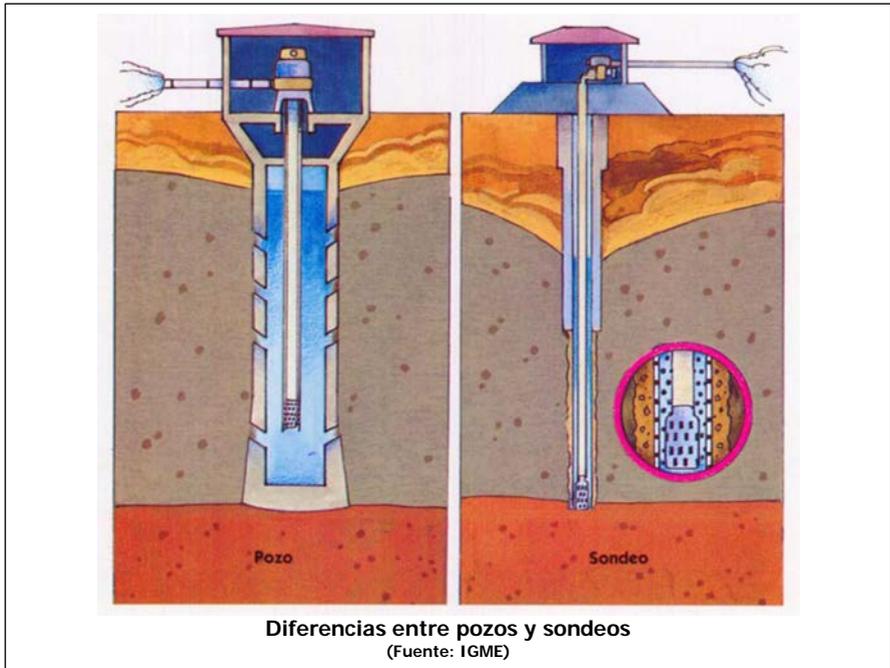
Para cumplir las condiciones anteriores pueden utilizarse revestimientos, sistemas de protección o sistemas de tratamiento de agua y, en cualquier caso, la instalación de suministro de agua debe tener características adecuadas para evitar el desarrollo de gérmenes patógenos y no favorecer el desarrollo de la biocapa (biofilm).

2. POZOS Y SONDEOS

Inicialmente se llamaban pozos exclusivamente a las excavaciones de gran diámetro y escasa profundidad efectuadas en terrenos blandos, fundamentalmente de forma manual, con el fin de extraer agua subterránea. El término sondeo correspondía a aquellas perforaciones, generalmente realizadas con maquinaria, con menor diámetro y mayor desarrollo en profundidad, independientemente de que se tratará de sondeos de investigación o de explotación. Hoy día ya, los sondeos cuyo objetivo es la captación de aguas subterráneas también se denominan en muchas ocasiones pozos de agua, reservando el término “sondeo” al sondeo de investigación hidrogeológica.

Consecuentemente y, dado que en la actualidad apenas se realizan pozos de forma manual y la maquinaria de sondeos permite ejecutar sondeos de diámetros cada vez mayores, la tendencia más generalizada es llamar pozo o “captación hidrogeológica” a aquellos sondeos que, una vez acondicionados y equipados

permiten la extracción de aguas subterráneas. De esta forma los pozos tradicionales de gran diámetro realizados por métodos manuales o maquinaria se conocen con el nombre de "pozos abiertos".



No obstante, aunque ambos tipos se realizan para extraer las aguas subterráneas, conviene señalar aquellas diferencias que los caracterizan:

- Los pozos son de diámetros grandes (más de un metro) y poco profundos (rara vez alcanzan los 10 y 12 metros). Se revisten de ladrillo hueco o de aros de hormigón, en ambos casos con unos orificios destinados a permitir el paso del agua desde el acuífero hacia el interior del pozo. Cuando en su construcción el pozo se complementa con unas galerías horizontales o unos tubos radiales a modo de brazos para aumentar el caudal que pasa hasta el pozo, reciben el nombre de "pozos radiales".
- Los sondeos son estrechos y profundos (a veces llegan a 500 metros de profundidad). Para sacar el agua, hay que instalar una motobomba y una tubería. Se revisten con tuberías metálicas ranuradas o agujereadas en la zona

que atraviesa el acuífero para permitir el paso del agua. Cuando el acuífero tiene arenas muy finas que son arrastradas por el agua en su movimiento, se colocan filtros de gravas de tamaños adecuados, entre la pared del sondeo y la tubería ranurada.

Ambos requieren una forma de construcción que permita sacar el máximo partido al acuífero facilitando el paso de las aguas desde éste el interior del pozo o sondeo. También en ambos casos, las obras de captación deben cerrarse al nivel de la superficie para que no entren ni se arrojen objetos extraños. Se evita así una eventual contaminación.



Las dos primeras etapas que se indican en la figura, son comunes tanto para sondeos de explotación como para los de investigación, mientras que las dos últimas son exclusivas de los sondeos de captación (explotación).

A modo de breve descripción, a continuación se describen cada una de estas fases.



Perforación de un sondeo hidrogeológico.

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO

Es una de las etapas fundamentales, ya que la calidad en estos estudios previos condiciona totalmente el éxito del conjunto del proyecto y, paradójicamente, en muchas ocasiones no recibe ni el tratamiento adecuado ni se dispone de profesionales capacitados para su realización. Los resultados de los estudios hidrogeológicos son la base para el diseño de la captación (ubicación, geometría de acuíferos, niveles piezométricos, caudales esperados, etc.) y la justificación de la construcción de pozos y sondeos. Un mal estudio hidrogeológico o la ausencia del mismo, puede resultar en la realización de costosas inversiones en construcción de pozos con resultados negativos, cuando de estos estudios representan costes muy bajos con respecto a los presupuestos de una obra de captación de aguas subterráneas.



Como se verá más adelante, los trabajos realizados en un estudio hidrogeológico están constituidos por inventarios de puntos de agua, piezometrías, análisis químicos, reconocimientos geofísicos de superficie y, en no pocas ocasiones, por sondeos de investigación hidrogeológica. Como resultado e todo ello, se obtienen un conjunto de datos de partida que sirven de base para la elaboración del proyecto constructivo. Entre estos datos cabe destacar:

- Ubicación del pozo o sondeo.
- Accesos, suministros de agua y energía, así como condicionantes territoriales (medioambientales, espacios naturales etc.).
- Columna litológica prevista y niveles productivos, indicando la profundidad recomendada.
- Estimación del caudal de agua y rendimiento específico de la captación.
- Previsión de las características hidroquímicas del agua.
- Consideraciones y recomendaciones para el diseño y seguimiento de la obra.

ETAPA CONSTRUCTIVA

Con el fin de obtener un rendimiento óptimo en la captación es imprescindible garantizar la calidad en la ejecución de la obra. El control de calidad deberá ser preciso y meticuloso al objeto de garantizar que la ejecución es acorde con las previsiones de diseño plasmadas en el proyecto constructivo y que la obra se ejecuta en la forma y manera que se ha previsto.

INSTALACIÓN DEL EQUIPAMIENTO ELECTROMECAÍNICO

El equipamiento del pozo de captación permite la extracción de agua subterránea hasta la superficie para su aprovechamiento efectivo. En la actualidad la mayoría de las captaciones se equipan con suministro eléctrico y bombas sumergibles, si bien en algunos casos se utilizan motores de combustión interna y bombas de eje horizontal y vertical. Puesto que en los pozos se introducen bombas para la impulsión de agua subterránea, es necesario construir los pozos con diámetro suficiente para la correcta instalación de los equipos.

PUESTA EN SERVICIO

Una vez realizadas correctamente todas las etapas anteriores, se dispondrá entonces de un pozo de captación para suministro de agua subterránea, con la optimización de los recursos empleados.

2. TÉCNICAS UTILIZADAS PARA LA PERFORACIÓN DE SONDEOS DE INVESTIGACIÓN

1. LA INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA

Los objetivos de la investigación hidrogeológica que debe preceder los trabajos de construcción de una red de pozos, son el llegar a determinar la naturaleza, espesor y estructura de las formaciones que constituyen los potenciales acuíferos, estableciendo sus relaciones con otras unidades geológicas y el modelo de funcionamiento hidrogeológico, así como investigar su capacidad de aportar agua, determinando los parámetros hidráulicos de los materiales que los constituyen.

La investigación se debe plantear en dos fases, una primera de recopilación y análisis de la documentación existente y la realización de estudios de detalle en campo de mayor o menor extensión, y una segunda fase en la que, en función de los resultados de la primera, se realizarían sondeos de investigación.

De forma esquemática, el conjunto de los trabajos se distribuye en:

- Recopilación documental y estudio de la información geológica e hidrogeológica disponible en organismos e instituciones.
- Reconocimiento geológico e hidrogeológico de la zona.
- Análisis geológico estructural.
- Análisis hidrogeológico de las masas de agua subterránea del entorno.
- Propuesta de realización de sondeos de reconocimiento.



Trabajos de investigación hidrogeológica.

1.1. RECOPIACIÓN DOCUMENTAL Y ESTUDIO DE LA INFORMACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA DISPONIBLE EN ORGANISMOS E INSTITUCIONES

Al inicio de los trabajos y, siempre como primera fase del estudio, se llevará a cabo una recopilación, revisión e integración de toda la información disponible en diferentes organismos e instituciones implicados tanto en la realización de estudios e investigaciones geológicas e hidrogeológicas, como en la gestión de los recursos hídricos, y que toda ella esté relacionada con el área de estudio.

La información a recopilar será toda la disponible, accesible y necesaria para obtener un suficiente conocimiento de la hidrogeología y del grado de explotación de la zona objeto de estudio. La intensidad y profundidad con la que debe realizarse éste estudio es tanto mayor cuanto más importante sea la dimensión de las captaciones a construir y/o cuanto mayor sea la profundidad e importancia de los acuíferos objeto de aprovechamiento.

Entre los organismos e instituciones a los que se debe acudir figuran, al menos, los

siguientes, aunque la lista no debiera limitarse sólo a ellos:

- Confederación Hidrográfica (o Autoridad de Cuenca Hidrográfica) correspondiente para consultar el registro de aprovechamientos de aguas subterráneas, inventarios de puntos de agua, datos foronómicos e inventarios de recursos hidráulicos, datos de calidades químicas, evolución piezométrica, Planes Hidrológicos, estudio de masas de agua subterránea, etc.
- Instituto Geológico y Minero de España donde consultar cartografía geológica diversa, estudios geológicos y mineros, geofísicas, estudios hidrogeológicos, inventarios de puntos de agua, datos de calidad química, evolución piezométrica, etc.
- Consejerías de Obras Públicas de las correspondientes Comunidades Autónomas u organismos dependientes de ella para consulta de informes y estudios hidrogeológicos para abastecimientos, etc.
- Universidades, con el fin de consultar tesis doctorales, tesis de licenciatura, publicaciones en congresos, simposios, seminarios y revistas científicas y cualquier otro tipo de trabajo de éste tipo relacionado con el área a investigar.
- Instituto Nacional de Meteorología para la consulta de datos climáticos.
- Otros organismos de interés.

En lo que a recopilación e integración de información geológica se refiere, las buenas prácticas recomiendan que ésta se extienda, al menos, a las siguientes informaciones:

- Cartografía geológica y geológico-minera
- Cartografía y memorias MAGNA 1:50.000
- Cartografía e informes geológico-mineros para la prospección de minerales y rocas industriales
- Estratigrafía, Sedimentología y Tectónica
- Columnas litoestratigráficas de las formaciones de interés y de sus adyacentes de techo y de muro así como de sus variaciones laterales.
- Estudios, tesis, publicaciones e informes con datos sobre estratigrafía, sedimentología, y estructura regional y local, que afecte a las formaciones objetivo.
- Geofísica y estudios realizados en la región. Datos geofísicos, geológicos e hidrogeológicos derivados de trabajos de geofísica (eléctrica, magnetometría, gravimetría, etc.), realizados para la prospección de agua subterráneas o recursos minerales.

De manera análoga se debe recopilar y analizar la información relacionada con

Hidrogeología de la zona, lo que significa prestar atención a informaciones tales como:

- Datos geométricos
- Límites de los acuíferos en superficie y/o en profundidad
- Tipo de límites
- Relaciones y grado de conexión con otros acuíferos o con ríos
- Definición de las características de los acuíferos: libres, confinados, semiconfinados, número y tipo de acuíferos existentes, captados, etc.
- Datos hidrogeológicos
- Parámetros hidráulicos (permeabilidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento y/o porosidad eficaz, coeficientes de goteo, etc.)
- Datos piezométricos. Mapas de piezometría, distribución areal y en profundidad. Evoluciones piezométricas. Gradiente hidráulico. Componentes verticales de flujo.
- Datos de usos y demandas de agua
- Estudio específico de los usos de agua en las masas de agua subterránea definidas en el área con definición de los usos actuales del agua subterránea.
- Datos climatológicos e hidrológicos
- Recopilación de datos climatológicos en la cuenca. Análisis y evaluación del tratamiento y elaboración de datos previos.
- Recopilación de datos hidrológicos en la cuenca. Análisis y evaluación del tratamiento y elaboración de datos previos.
- Integración de los datos climático-hidrológicos con la información hidrogeológica a fin de contrastar las hipótesis previas sobre funcionamiento hidráulico de los acuíferos y la recarga.
- Datos químicos e isotópicos de las aguas

Es importante tener en cuenta los datos hidroquímicos disponibles que informen de la composición de las aguas subterráneas procedentes de sondeos y manantiales existentes, con el fin de poder estudiar las relaciones y evoluciones hidrogeoquímicas según el sistema de flujo. Asimismo, la recogida y análisis de la información isotópica disponible sirve como apoyo a la interpretación del funcionamiento hidrogeológico.

1.2. RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO DE LA ZONA

A partir de la integración de toda la información documental recopilada, se estará en condiciones de realizar un reconocimiento geológico e hidrogeológico exhaustivo de la zona de estudio para comprobación in situ de esas informaciones y recopilación de nuevos datos que permitan cubrir lagunas o falta de datos. Es habitual que el programa de trabajos incluya muchas de las siguientes actividades:



				LOCALIZACION:	COORDENADAS			SONDEO	
				PETICIONARIO:	X =	Y =	Z =	HOJA Nº	de
				NATURALEZA Y DESCRIPCION DEL TERRENO	PIECERA:			ENSAYOS	
DIAM. Y TIPO DE PERF.	PROFUNDIDAD (m)	ESPESOR DE LESTES (cm)	CORRELITOLÓGICO		% RECUPERACION	INTERVALO MUESTRA	MUESTRA Nº	COV's (ppm)	ENSAYOS LAB. SI / NO
									PERMEABILIDAD TERMO m/s
									PIEZOMETRIA
0									
10									
20									
30									
40									
50									
60									
70									
80									
90									
100									

Ejemplo de ficha de columna litológica para su utilización en trabajos de campo

- Realización de planos a varias escalas (1:50.000, 1:25.000 y otros de mayor detalle a escala 1:10.000) recogiendo la síntesis de la información cartográfica recopilada una vez revisada en campo, y en el que se detallarán y diferenciarán claramente las formaciones que constituyen los acuíferos.
- Realización de uno o varios documentos de síntesis de los datos estratigráficos y sedimentológicos de las formaciones objetivo (litofacies, espesores, sedimentología, cambios laterales de facies, niveles guía, etc.) y de la información estructural de la zona.
- Cortes geológicos detallados con toma de datos sobre el terreno, que permitan la reconstrucción geométrica de las estructuras en estudio.
- A partir de la recopilación de las bases de datos de puntos de agua y de los inventarios de la zona, análisis de los puntos de agua relevantes (sondeos y pozos y manantiales), para posteriormente llevar a cabo una campaña de campo con inventario de puntos de agua en toda la zona, haciendo énfasis en las áreas con lagunas de información.
- Identificación y delimitación de los acuíferos más importantes, apoyándose en la interpretación geológica realizada y en la información hidrogeológica recopilada de la zona de estudio.
- Revisión del estado actual de las instalaciones existentes en el área de estudio que puedan proporcionar información útil, tales como estaciones de aforo, piezómetros, pozos, etc. Evaluación de las mediciones y controles que se realizaron.
- Inventario hidrogeológico de los elementos de interés existentes en la zona de estudio: manantiales, pozos, drenajes, cauces, zonas de infiltración kársticas, sumideros, surgencias, etc., registrando los siguientes parámetros de interés:
 - Aforo de caudales, consumos y destino.
 - Niveles piezométricos
 - Esquema constructivo del alumbramiento y, si es posible, columna litológica atravesada.
 - Instalaciones asociadas: impulsiones, conducciones, depósitos, balsas, etc.
 - Parámetros fisicoquímicos básicos [pH, temperatura, conductividad etc.).



Trabajos de investigación hidrogeológica. Sondeos de reconocimiento.

- Completar/corregir la cartografía geológica-hidrogeológica de detalle existente en el área de estudio, donde sea necesario.
- Muestreo de los puntos de agua más significativos (manantiales, pozos y sondeos), realizando posteriormente en laboratorio análisis químicos de los componentes mayoritarios, con el fin de realizar la caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas. Esta se realizara una vez identificados los puntos de agua que sean destacables y tras evaluar su importancia de cara a su utilidad para la interpretación del funcionamiento hidrogeológico, entre las masas de agua conocidas y las formaciones carbonatadas bajo la depresión terciaria.
- Integración de la información del subsuelo a partir de la información publicada (sísmica de reflexión, sondeos electromagnéticos de dominio tiempos, sondeos de investigación petrolífera, diagrfias y ensayos de sondeos, etc.). En este estudio de subsuelo se definirá el potencial de estos acuíferos, obteniéndose datos sobre su composición química determinando su continuidad en el subsuelo mediante la interpretación de los perfiles sísmicos, elaborándose los correspondientes mapas de isobatas, cortes geológicos y en su caso cálculos geométricos y

volumétricos a partir de los datos petrofísicos de porosidad e indicaciones de permeabilidad en sondeos.

- En el caso de que el estudio se enfoque hacia acuíferos profundos, es interesante la integración de la información pública de investigaciones petrolíferas y disponible en el Ministerio de Industria y en el IGME:
 - Sondeos (columnas litológicas, diagrfías e informes finales), pruebas de producción, informes de análisis de fluidos, y demás información de perforación (perdidas de lodos durante la perforación, ganancias, dilución del lodo, etc.), que permitirán individualizar y caracterizar tanto formaciones acuífero (por su porosidad, permeabilidad, presión, etc.) como fluidos (conductividad, salinidad y composición química, temperatura, etc.).
 - Sísmica de reflexión (perfiles, cortes, mapas de isobatas, isobatas, etc.). Se comenzará por recopilar y analizar detenidamente toda la información disponible sobre geofísica sísmica, gravimétrica y magnética, la cual será correlacionada con los resultados de los sondeos profundos de la zona y con la geología de superficie, con objeto de poder realizar una interpretación integral del subsuelo del área de estudio lo más completa posible.

1.3. ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA DEL ENTORNO

Una vez analizadas las bases de datos de puntos de agua (de la Confederación Hidrográfica, del IGME, etc.), así como los inventarios previamente recopilados, se llevará a cabo una campaña de campo de reconocimiento de los puntos de agua seleccionados, así como un inventario selectivo de puntos de agua de interés no inventariados, con el fin de establecer relaciones tanto geológicas como de funcionamiento hidrogeológico de las formaciones. La información obtenida se relacionará con la información geológica y del subsuelo, y se analizará en cuanto a:

- Piezometría y oscilaciones de niveles piezométricos.
- Isotransmisividades
- Isopacas de los acuíferos y de profundidad de la zona saturada.
- Usos del agua (abastecimiento, agrícola, ganadero, industrial, etc.).

De esta forma se pueden identificar los acuíferos existentes y analizar la información reunida referente a límites abiertos y/o cerrados, extensión de los mismos, etc. Se pueden establecer correlaciones con los resultados obtenidos en la información geológica y con los perfiles geofísicos de los que se disponga, llegar a caracterizar la geometría en profundidad de las formaciones objetivo.

Para el conocimiento hidrogeológico del ámbito de estudio no sólo es importante evaluar los recursos disponibles, sino también la calidad de los mismos. Para ello es preciso analizar la composición química que presentan las aguas subterráneas, tanto en zonas de recarga, como de circulación y descarga, o el estudio de procesos de mezcla y de conexiones entre formaciones litológicas existentes. La caracterización hidroquímica e isotópica se realizará sobre los resultados analíticos procedentes del muestreo de aguas subterráneas en los puntos de control, definidos previamente y que contemplará además el muestreo de agua de lluvia o de manantiales asimilables a descargas locales.

A partir del estudio de los datos foronómicos, de piezometría e hidroquímica de las aguas subterráneas se establecerá el funcionamiento de las áreas de recarga y descarga de los acuíferos, así como, la forma de recarga en las formaciones objeto de investigación o, por ejemplo, si guardan relación con series aflorantes y/o con la recarga a través de otros depósitos suprayacentes y en que medida. Para interpretación de las características dinámicas de los acuíferos se llevan a cabo las siguientes actividades:

- Interpretación de los mapas litológico-estructurales definidos por la geología de detalle realizada, la geofísica efectuada y los datos obtenidos del análisis del inventario de puntos de agua, fundamentalmente parámetros hidrogeológicos.
- Interpretación de los resultados de los análisis hidroquímicos, e isótopos efectuados en las aguas subterráneas.
- Interpretación y elaboración de toda la información en su conjunto, datos de piezometría, de oscilaciones de nivel piezométrico, de isopacas de los acuíferos, de profundidad de la zona saturada, parámetros hidrogeológicos (permeabilidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, etc.), de geología y de subsuelo. Que permitirá establecer de este modo, las direcciones de flujo subterráneo, dentro de cada acuífero, los flujos entre los acuíferos colindantes y en definitiva las relaciones entre los distintos acuíferos.

Asimismo, se suele llevar a cabo una primera aproximación de la estimación de la recarga natural de los acuíferos en base a datos de precipitación y evapotranspiración habida cuenta de las características geológicas y topográficas de

la zona.

1.4. PROPUESTA DE REALIZACIÓN DE SONDEOS DE RECONOCIMIENTO

Una vez integrada toda la información obtenida de las sucesivas etapas de análisis y reconocimiento planteadas durante el estudio, se estará ya en disposición de pasar a evaluar la necesidad e idoneidad de plantear una campaña de investigación mediante la ejecución de sondeos mecánicos de investigación, de manera que se pueda ampliar la información disponible y su precisión.

De este modo los sondeos de investigación que se propongan deben cumplir la condición de permitir aportar, por un lado, información geológica de las series atravesadas que complementa la interpretación de los resultados y, por otro lado, facilitar la realización de ensayos hidráulicos, como pruebas de bombeo o de inyección, todo ello encaminado a aportar datos fiables y concretos sobre los parámetros hidrogeológicos de los materiales atravesados por los sondeos.

La ubicación y profundidad de los sondeos vendrá impuesta por razones geológicas y sus características constructivas (método de perforación, diámetros de perforación y entubación, diseño, etc.), serán objeto de estudio detallado para cada caso individual en función de los objetivos concretos de la campaña de investigación.

2. SISTEMAS DE PERFORACIÓN

Los sondeos de investigación hidrogeológica se llevan a cabo dentro de los estudios hidrogeológicos ante la falta de información suficiente, pero también se pueden realizar en zonas suficientemente conocidas pero en las que es necesario disponer de piezómetros de control de los niveles de las aguas subterráneas en el entorno próximo. Con la realización de estos sondeos se obtienen datos fundamentales para tomar decisiones en relación al acuífero estudiado y, en particular, respecto a la posterior ejecución de pozos de captación y a las características de los mismos.

Estos sondeos se realizan preferentemente a testigo continuo y quedan acondicionados como piezómetros, con revestimiento de PVC, de manera que permitirán conocer el nivel piezométrico de las aguas subterráneas en la zona antes de realizar pozos de captación. También suministrarán datos posteriormente de las afecciones sobre las aguas subterráneas, por efecto del bombeo en los pozos que

se pongan en servicio.

La técnica de perforación a rotación con testigo continuo es la más adecuada y utilizada en sondeos de investigación hidrogeológica, puesto que la recuperación del testigo de roca de forma continua permite obtener datos acerca de la geología, hidrogeología y otras condiciones del subsuelo, imposible de obtener con ningún otro método de perforación. No obstante en ciertas ocasiones se utilizan sistemas de perforación destructivos, que no permiten obtener testigo sino tan solo un detritus de perforación. Entre estos sistemas cabe diferenciar los que son específicamente de investigación, como es el caso de la rotopercusión inversa con pequeño diámetro, y aquellos otros que no son exclusivamente de investigación sino que constituyen una fase preliminar, con diámetro pequeño, en los pozos de explotación.

El método de rotopercusión a circulación inversa con pequeño diámetro se emplea mucho en la investigación minera. Habitualmente se utilizan sondas mixtas que permiten perforar por este sistema y a testigo continuo, indistintamente. Los equipos mixtos suelen ser autotransportados y van montados sobre camión o sobre cadenas.

Para la perforación a rotopercusión es necesario el empleo de un compresor. El polvo producido con el material perforado se recoge en un ciclón situado a la salida. Al tratarse de circulación inversa el material perforado circula por el interior del varillaje de perforación en lugar de por el espacio anular entre el varillaje y la pared de la perforación. Por esta razón las muestras extraídas no sufren decalaje ni contaminación y son mucho más representativas del material del subsuelo. Además, la rotopercusión presenta una ventaja sobre el sistema de testigo continuo en los sondeos de investigación hidrogeológica que es la posibilidad de extraer agua con el aire de perforación y poder evaluar el acuífero en cantidad y calidad. Si la circulación es inversa, por las mismas razones antes explicadas se entiende que la muestra de agua obtenida es representativa del terreno atravesado.

En muchas ocasiones con el empleo de sondas mixtas se perfora una parte del sondeo a destructivo en una zona de superior de menor interés, por ser conocida, continuándose el sondeo a mayor profundidad con el empleo de testigo continuo.

Otros sistemas de perforación de investigación lo constituyen aquellos métodos de perforación que se emplean para la realización de pozos de captación cuando se realizan con pequeño diámetro. Constituyen en este caso perforaciones piloto o de pre-explotación que se ensanchan al diámetro previsto como pozos de explotación si el resultado es positivo, o se abandonan si es negativo.

Esta es una práctica habitual en el caso de la rotopercusión de explotación (tanto a

circulación directa como inversa) que inicialmente se realiza con pequeño diámetro y que, en función del caudal extraído, se decide su abandono, entubación o incluso ensanche posterior para entubar con mayor diámetro.

En el caso de otros métodos que habitualmente se emplean para la realización de pozos de captación como son la percusión y la rotación a circulación inversa también es frecuente la realización de sondeos de preexplotación, si bien los datos que se obtienen para tomar decisiones no son tan concluyentes como los de la rotopercusión, especialmente la inversa.

3. **ETAPAS CONSTRUCTIVAS**

Las etapas constructivas de un sondeo de investigación hidrogeológica son, básicamente las siguientes: perforación, acondicionamiento, limpieza, ensayos y acabado. Es imprescindible la presencia de personal técnico adecuadamente formado para la interpretación en continuo, durante la ejecución de la obra, de los resultados y la toma de decisiones al mismo tiempo sobre la continuación del sondeo y las pruebas a realizar.

- **Perforación.** Como ya se ha indicado anteriormente, los sondeos de investigación que más se emplean son los de testigo continuo por la calidad de los datos obtenidos. En algunas ocasiones durante la realización de una perforación de investigación se efectúan ensayos de inyección del tipo Lefranc o Lugeon que permiten evaluar la permeabilidad de las formaciones atravesadas.
- **Acondicionamiento.** En el esquema constructivo de un sondeo de investigación se contempla su engravillado y cementación para lo cual es preciso que el diámetro mínimo de entubación sea suficiente para la introducción de los equipos de medida. El que habitualmente se utiliza es de 50 mm de interior, medida que permite perfectamente la introducción de un hidronivel para medida de niveles de agua.
- **Limpieza y ensayos.** Una vez acondicionado el sondeo, se procede a su limpieza mediante bombeo de agua con aire comprimido. Una vez limpio el sondeo se continúa el bombeo como prueba para evaluar las posibilidades hidrogeológicas del acuífero, tanto en lo referente a cantidad como a calidad mediante la toma de muestras de agua y para obtener datos previos de los parámetros hidrodinámicos del acuífero. En algunas ocasiones a la finalización del sondeo también se realizan ensayos específicos para calcular los parámetros hidrodinámicos entre los que cabe

destacar el ensayo Gilg-Gavard, que en esencia consiste en llenar de agua el sondeo hasta una determinada cota y medir el posterior descenso de nivel, controlando la evolución temporal, hasta su estabilización. La interpretación de estos datos permite obtener, entre otros parámetros, los valores de permeabilidad.

- **Acabado final.** Una de las aplicaciones más interesantes de un sondeo de investigación es el servir de piezómetro o punto de observación de niveles de agua subterráneas para lo cual debe tener un acabado adecuado en superficie que garantice su duración y efectividad. Para ello, en superficie es preciso realizar una solera de hormigón con una ligera pendiente hacia el exterior que permita evitar la infiltración del agua de lluvia o de escorrentía. Sobre esta solera se ubica una placa identificativa del sondeo. En el tubo que sobresale en cabeza se suele colocar un tapón metálico roscado. Si se prevén problemas de vandalismo en la zona es preciso disponer de una arqueta de protección con llave de seguridad. En algunos casos de interés, en los sondeos piezométricos se dejan instalados aparatos que permiten el registro en continuo de niveles e incluso es posible transmitir información y señales a centros de control.

4. DATOS OBTENIDOS

Como resultado de un sondeo de investigación hidrogeológica, se obtiene una gran cantidad de información referente a las posibilidades de captación de agua subterránea en la zona:

- **Litología:** En función del conocimiento de la naturaleza de los materiales atravesados se puede establecer si los mismos constituyen un acuífero y si se trata de materiales con porosidad primaria o secundaria. De esta forma quedará definida la ubicación de los distintos acuíferos, definiendo sus límites, acorde con los substratos impermeables que se detecten.
- **Geometría:** Si se dispone de datos en distintos sondeos de investigación sobre la ubicación de los distintos acuíferos (situación de techo y muro), es posible conocer la geometría de los mismos.
- **Niveles piezométricos:** Todo sondeo de investigación hidrogeológica debe ser utilizado posteriormente como piezómetro de registro de niveles piezométricos. De esta forma, conjuntamente con la geometría del acuífero, podremos cuantificar las reservas y conocer su evolución en función del tiempo. También tiene una gran utilidad como piezómetro para

interpretar los ensayos de bombeo que puedan realizarse en sus proximidades.

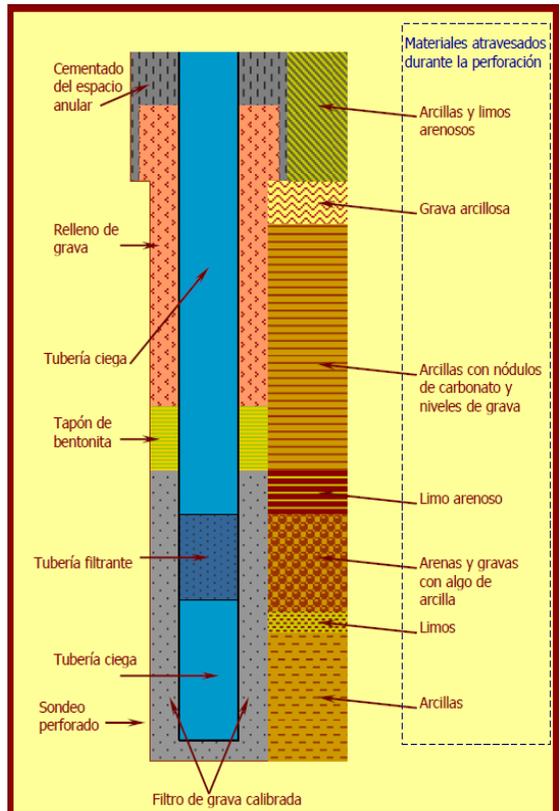
- **Evaluación previa de las posibilidades del acuífero:** Con los ensayos de bombeo con aire realizados a la finalización de los sondeos de investigación se puede obtener una evaluación previa del acuífero en cuanto a calidad y cantidad, dentro de las limitaciones que presenta el método de bombeo y los diámetros de que se dispone.
- **Perforabilidad:** La perforación a testigo continuo es un método que en general es aplicable a todos los materiales pero no sucede así con los sistemas de perforación destructivos y con los de gran diámetro también utilizados para captación de aguas subterráneas. El dato más importante para definir la perforabilidad de un material es el de la resistencia a compresión simple que tiene una relación directa con la litología del terreno observada en los testigos, por lo que no suele ser necesario realizar ensayos en laboratorio.
- **Diseño de la captación de aguas subterráneas:** Con todos los datos anteriores se dispone de la mayor parte de los criterios de diseño de los pozos de captación de aguas subterráneas, es decir, método de perforación, profundidad, entubaciones, engravillado, cementaciones, etc.

3. ORGANIZACIÓN Y EJECUCIÓN DE UNA CAMPAÑA DE POZOS Y SONDEOS PARA AGUA

1. CRITERIOS DE DISEÑO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS SONDEOS

Se atenderán los siguientes aspectos:

- Profundidad a alcanzar.
- Diámetro:
 - De perforación.
 - Del entubado.
- Método de perforación.
- Entubado.
- Rejilla y relleno de grava.
- Desarrollo.
- Protección sanitaria.
- Control y vigilancia de la obra:
 - Eficiencia de una captación.
 - Trabajos de Inspección.
 - Control de ejecución de la obra.
 - Control de mediciones.
 - Control presupuestario.
 - Control de programación.
 - Control de calidad.



1.1. PROFUNDIDAD DE LA CAPTACIÓN

La profundidad que deba ser alcanzada por un pozo vertical es un dato fundamental y viene definida por las características de la formación a explotar: ubicación del acuífero objetivo, situación de los niveles piezométricos y transmisividad del sistema. La información para determinar esta profundidad a prever se obtiene de estudios geológicos e hidrogeológicos previos, de datos de sondeos mecánicos de reconocimiento, datos de investigaciones geofísicas y de otros pozos anteriores. A continuación se describen brevemente estos aspectos:

Ubicación del acuífero: La profundidad de la captación debe de ser tal que permita interceptar, en principio en todo su espesor, al acuífero del que se desea captar y, consecuentemente, no sobrepasar el material impermeable infrayacente, optimizándose la longitud de perforación.

Niveles piezométricos: Si se trata de un acuífero libre es necesario garantizar que se atraviesa el nivel freático con la perforación y que la obra no quedará en seco durante su explotación, teniéndose en cuenta que durante la extracción de agua el nivel del pozo en estático disminuirá hasta una posición dinámica, acorde con el caudal de extracción y su rendimiento específico. Si se trata de un acuífero confinado, al alcanzar el techo del mismo se interceptará el nivel piezométrico, siendo válido lo indicado respecto a los niveles dinámicos. En cualquier caso es necesario prever los descensos que podrían producirse en el nivel regional a lo largo de la vida útil de la captación (o al menos del orden de unos 10 años), a partir de los datos históricos obtenidos en el estudio hidrogeológico.

Transmisividad del acuífero: La transmisividad de un acuífero es un parámetro hidrodinámico que establece la potencialidad del mismo. Viene definido como el producto de su permeabilidad por su espesor. En condiciones ideales, la captación debería atravesar toda la potencia del acuífero, pero esto no siempre se consigue y, en muchas ocasiones, los pozos son parcialmente penetrantes. Bajo estas condiciones la transmisividad efectiva para los periodos de bombeo habituales corresponde al producto de la permeabilidad por el espesor atravesado, por lo que el desarrollo de la obra en profundidad redunda en un mayor rendimiento de la captación.

Si se perfora en un acuífero libre, se deberá considerar el interés de alcanzar su zócalo impermeable, salvo que los caudales deseados, los condicionamientos económicos del pozo o una profundidad excesiva de dicho zócalo, hagan aceptable una solución de pozo parcialmente penetrante.

Si se perfora sobre un acuífero confinado, y salvo excepciones, por razones de hidráulica subterránea se aconseja atravesarlo completamente.

1.2. DIÁMETRO DEL SONDEO

El elemento principal en la ejecución de un sondeo es la estructura del pozo, que se caracteriza por los diámetros de perforación, los diámetros y las profundidades de entubación y las cementaciones necesarias. El diámetro de perforación de un pozo está directamente relacionado con la cantidad de agua que se espera obtener de la



captación, puesto que se debe permitir instalar la bomba con diámetro adecuado para que su capacidad de bombeo sea la prevista. Consecuentemente, en el dimensionamiento del pozo nunca deben olvidarse ni la necesidad de introducir equipos de bombeo ni sus características.

Por otro lado, los diámetros a emplear también serán función del método de perforación y del posterior acondicionamiento previsto para el pozo y reflejados en los esquemas constructivos.

Habitualmente los caudales que se pueden extraer con electrobombas sumergibles aumentan en función del diámetro de las bombas. Por lo tanto los diámetros que hay que considerar en el diseño de una captación hidrogeológica son los siguientes:

- Diámetro de la electrobomba sumergible.
- Diámetro de la tubería de revestimiento del pozo.
- Diámetro de perforación.

La correcta selección de la estructura del sondeo es fundamental para una eficaz ejecución. Se debe llegar a la profundidad deseada con la adecuada relación entre el diámetro de la entubación y el diámetro de perforación en cada tramo. Para determinar cuál debe ser la luz entre el entubado y las paredes del sondeo, se utilizan en muchas ocasiones los datos empíricos obtenidos de la práctica.

Electrobomba:

De acuerdo con la demanda prevista y considerando el caudal previsible y a los datos hidrogeológicos, en lo referente a los niveles dinámicos a considerar, se procede en la fase de diseño a una selección previa de la bomba a la que corresponderá un diámetro " D_B ". Obviamente a la finalización de la construcción del pozo se realiza un ensayo de bombeo que permita ratificar estas previsiones antes de proceder a la instalación del equipamiento definitivo.

Revestimiento o entubación del sondeo:

El revestimiento del sondeo se realiza habitualmente con tubería de acero al carbono soldada. Su diámetro es función directa del diámetro de la bomba que se va a introducir en su interior y debe garantizarse la holgura suficiente. Para ello el diámetro interno de la entubación debe ser de, al menos, 100 mm superior al de la bomba " D_B ". En algunos equipamientos, en especial para bombas pequeñas (4-6 pulgadas), el diámetro determinante para colocar la bomba con suficiente holgura no es el de la propia bomba sino el de la brida de unión de los diferentes tramos de la

tubería de impulsión. Además de disponer de suficiente holgura, hay que verificar que el espacio anular entre bomba y tubería es tal que la velocidad de circulación del agua en el entorno de la bomba está comprendida entre 0.5 y 4 m/s. Velocidades superiores a 4 m/s causaría pérdidas de energía muy altas por rozamiento e incluso podría causar cavitación en la bomba. Por otra parte si la velocidad fuera inferior a 0,5 m/s, podrían producirse problemas de refrigeración en la bomba. Las velocidades de circulación en el interior de la tubería de impulsión se consideran entre 1,5-3 m/s.

A partir del diámetro interno de la entubación ("D_{IE}") y teniendo en cuenta el espesor de la tubería se determina el diámetro exterior de la entubación ("D_{EE}").

Diámetro de la perforación: Una vez conocido el diámetro externo de la tubería de revestimiento se puede establecer el diámetro más adecuado de la perforación "D_p".

La luz entre las paredes del sondeo y el diámetro exterior de la entubación será:

$$b = \frac{D_1 - D_0}{2}$$

Donde:

b = dimensión de luz (mm).

D₁ = diámetro del sondeo (mm).

D₀ = diámetro exterior del manguito de la entubación (mm).

Las dimensiones recomendables de luz varían entre 15 y 50 mm, dependiendo de la rigidez de la columna de entubación y del grado de desviación del sondeo. La siguiente tabla puede servir de orientación a éste respecto.

Diámetro exterior de la entubación (mm)	Luz entre las paredes del sondeo y el diámetro exterior de los manguitos de la entubación (dimensión "no mayor de", en mm)
114 y 127	15
141, 146 y 159	20
168 y 194	25
219 y 245	30
273 y 299	35
325 y 351	45
377 y 426	50

El diámetro del útil para perforar un diámetro correspondiente al de la entubación, se debe seleccionar de acuerdo con la luz mínima permisible y las condiciones de perforación.

Dividiendo la dimensión de la luz del sondeo entre su diámetro se obtiene el coeficiente de luz:

$$i = \frac{b}{D_1} = \frac{D_1 - D_0}{2 \cdot D_1}$$

De esta ecuación se puede obtener la dimensión del diámetro de perforación expresada por medio del coeficiente de luz y del diámetro del manguito de la entubación:

$$D_1 = \frac{l}{l - 2 \cdot i} \times D_2 = f \cdot D_2$$

Donde $f = \frac{l}{l - 2 \cdot i}$

De esta ecuación se deduce que el diámetro del sondeo se puede determinar multiplicando el diámetro exterior del manguito de la entubación que debe ser colocada en el sondeo por el coeficiente f. Véase la siguiente tabla.

Entubación	Diámetro ext. de la entubación (mm)	Diámetro ext. del manguito de la entubación (mm)	Dimensión mínima coeficiente "j"
Emboquillado	426	451	1,11
Emboquillado	377	402	1,12
Emboquillado	325	351	1,14
C. intermedia	273	298	1,17
C. intermedia	219	243	1,23
C. de explot.	168	188	1,32 - 1,47
C. de explot.	146	166	1,18 - 1,35

1.3. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE PERFORACIÓN

La selección del método de perforación está relacionada con la profundidad y el diámetro de la perforación, así como con la litología del terreno a perforar. Al igual que la profundidad de perforación, las características litológicas del terreno a atravesar son datos de partida que se obtienen como resultado del estudio hidrogeológico previo.

La litología del subsuelo no solamente determina las posibilidades hidrogeológicas en cuanto a la presencia o no de acuíferos explotables para captación de agua subterránea, sino que además condiciona totalmente el método a emplear en una obra de perforación, puesto que este método es función de la perforabilidad de los materiales a atravesar. Esta perforabilidad viene definida por ciertas características físicas de la roca entre las que destacan su resistencia mecánica y otros parámetros tales como la dureza, fracturación, karstificación, coherencia, etc.

De entre todos los parámetros geomecánicos que proporcionan información sobre la perforabilidad de un terreno, el más representativo es el de su resistencia mecánica, que se determina por medio del ensayo a compresión simple. El dato de litología y estructura del terreno, además de incidir en el proceso de selección del



sistema de perforación, también permite planificar en fase de proyecto los distintos tipos de entubaciones y las reducciones de diámetro necesarias para alcanzar la profundidad de diseño con el diámetro mínimo que permita instalar la bomba adecuada.

Los factores de profundidad y litología son tan importantes en la fase de proyecto para el diseño de un pozo que, si no están suficientemente definidos, será preciso efectuar sondeos previos de investigación hidrogeológica.

1.4. RÉGIMEN DE PERFORACIÓN

Al proyectar el sondeo, se elabora y define un régimen de perforación para cada intervalo. El **régimen de perforación** es el conjunto de factores fundamentales que determinan los índices de avance y de calidad de trabajo y que influyen directamente en la efectividad del proceso de perforación. Estos factores son el tipo de útil, la carga sobre el mismo, velocidad de rotación, cantidad y calidad de líquido de perforación inyectado en el sondeo.

La correcta combinación de los elementos del régimen de perforación se determina según la dureza del terreno, del perfil de los dientes y su distribución en el útil de perforación, del diámetro del útil, profundidad del sondeo, además del tipo, calidad y estado del equipo y materiales utilizados.

Al determinar el régimen óptimo de perforación para determinados intervalos, se deben tener en cuenta las condiciones geológicas e hidrogeológicas, así como las cualidades físico-mecánicas de los terrenos: la perforación en dirección perpendicular a la estratificación de las formaciones geológicas es considerablemente más lenta que en dirección longitudinal; las rocas con una estructura macrogranular se perforan con mayor facilidad que las de estructura microgranular.

Por régimen de perforación óptimo se comprende la relación de parámetros que proporcionan los índices más elevados cualitativos y cuantitativos de carácter técnico y económico. A los índices cualitativos corresponde el grado de desviación del sondeo, el grado de saturación de las paredes del sondeo con bentonita. A los cuantitativos corresponde la velocidad de avance, la cantidad de metros perforados por útil, etc.

No se deben utilizar regímenes de perforación forzados en aquellos casos en los que el excesivo desgaste de material resulte, entre otras consecuencias, antieconómico.

En algunos casos, cuando el diámetro del útil se diferencia considerablemente del diámetro del varillaje, este último limita el peso que se le debería aplicar al útil según el régimen óptimo. Por ello entre el conjunto de todo el material destinado a la perforación de un sondeo debe existir una estrecha relación.



Varillaje para perforación con circulación inversa.
(Imagen cortesía de Sondeos Puebla, S.L.)

1.5. CARGA SOBRE EL ÚTIL

La presión sobre el útil en la perforación es más aconsejable realizarla por medio de las barras de carga y no con la cabeza de rotación en las sondas que lo permiten, ya que al no tomarse medidas de precaución, éste empuje provoca generalmente una desviación del sondeo, que puede dificultar enormemente la colocación del entubado y además origina un mayor desgaste del varillaje.

El aumento de la presión axial sobre el útil favorece a una mayor velocidad de avance, que puede variar en función de la dureza y de otras características del terreno a perforar.



Durante la perforación, es de gran importancia que la presión sobre el útil se aplique de forma paulatina y continuada, y no a impulsos. Una presión aplicada en forma de impulsos desgasta en exceso el tricono, reduciendo su rendimiento. Por ello, en muchos casos una presión paulatina sobre el útil proporciona una mayor cantidad de metros perforados por tricono.

El incremento de la velocidad de avance con el aumento de la presión sobre el útil está relacionado directamente con la cantidad y calidad del líquido de perforación inyectado que limpia el sondeo de detritus.

La presión axial sobre el útil se debe realizar con las barras de carga. La longitud de estas se debe calcular de manera que aproximadamente del 50 al 75 por 100 de su peso total lo soporte el útil y el resto de este peso mantenga en una tirantez constante en el tren de varillaje. Esto es importante, ya que el varillaje "comprimido" trabaja en condiciones desfavorables y en un estado inestable cuando surge una tensión de flexión alterna, lo que conduce a una fatiga acelerada del metal que puede causar rupturas del varillaje.

La experiencia práctica muestra que la longitud del tren de barras de carga en cualesquier condición de perforación no debería de ser menor de 12 m.

1.6. VELOCIDAD DE ROTACIÓN

En la perforación de arcillas blandas o arenas, la velocidad de rotación no tiene una significativa importancia, pudiéndose aconsejar para este caso una velocidad del orden de 100-150 rpm con una velocidad lineal de 1,17 a 1,75 m/s.

Perforando con triconos, se puede decir que la velocidad de rotación más efectiva es la inversamente proporcional a la dureza del terreno:

- En terrenos blandos se trabaja con unas 150-350 rpm, lo que corresponde a la velocidad lineal de 2,35 a 4,70 m/s.
- En terrenos duros se perfora con aproximadamente 40-80 rpm, lo que equivale a una velocidad lineal de 0,5-1 m/s.
- Existen, no obstante, numerosas variaciones de las recomendaciones citadas, que se hacen exclusivamente a título orientativo y en unas condiciones generales.

En términos generales, la velocidad de rotación se disminuye al aumentar el diámetro del útil, al disminuir el diámetro del varillaje, al encontrar terrenos abrasivos, al pasar de un terreno menos duro a uno más duro, así como al atravesar un terreno alterado de escasa potencia de las capas que tienen una dureza constante.

1.7. LÍQUIDO DE PERFORACIÓN

El líquido de perforación (lodo o agua) se utiliza para transportar el ripio a la superficie, aguantar las paredes del sondeo, enfriar las superficies de corte del útil y también para lubricar los elementos giratorios del útil.

Siempre que lo permitan las condiciones de operación, es aconsejable utilizar agua limpia como líquido de perforación en cualquier tipo de sondeo y en especial en sondeos para agua. La utilización de agua es mucho más barata y además se evita formar costra de bentonita sobre las paredes del sondeo, que es uno de los mayores inconvenientes de la utilización de lodos en la perforación a rotación en

sondeos para agua. El agua limpia se puede utilizar en terrenos estables o en perforación de arcillas ya que al disolverlas forma lodos naturales. Sin embargo, en el caso de perforar en terrenos inestables, se suele recurrir a la utilización de lodos para garantizar la estabilidad de las paredes del sondeo.

Generalmente, la condición fundamental en la perforación de terrenos blandos es proporcionar un mayor caudal, asegurando una mayor velocidad de ascenso del lodo, siendo el caudal necesario para terrenos duros notablemente menor. Para regular las cualidades del lodo se pueden emplear un conjunto de agentes químicos.



1.8. PERFORACIÓN CON AIRE

En determinadas ocasiones, se recurre a la utilización de aire comprimido para la perforación y limpieza del sondeo.

Cuando es aplicable, las ventajas fundamentales de este método en comparación con el empleo de líquidos son:

- La velocidad de avance se incrementa en 4 - 5 veces y la duración del útil lo hace en unas 10 veces.
- Se reducen e incluso suprimen los costes relacionados con la adquisición y

transporte del agua, bentonita, etc., evitándose además la necesidad de disposición de balsas y preparar lodos.

- En algunos casos es posible la perforación en intervalos con una pérdida total de lodos.
- Se facilitan las observaciones hidrogeológicas, determinando fácilmente los acuíferos.
- Se mantienen en mejor estado las paredes del sondeo para hacer pruebas de permeabilidad o aforos.
- No se producen paradas por falta de agua.

Entre los inconvenientes que tiene este método se pueden mencionar los siguientes:

- Aumenta el desgaste por abrasión y, si el pozo tiene agua, por corrosión del varillaje. Pero si se tiene en cuenta el considerable incremento de la velocidad de avance, entonces resulta que el desgaste del varillaje por un metro de avance es casi el mismo que perforando con lodo o agua.
- Perforando con aire, en caso de utilizar posteriormente una testificación eléctrica, se debe llenar el pozo de agua.
- Se requiere equipo adicional (compresor, medios antipolvo, etc.).
- En los últimos 20 años este método ha conseguido su plena aceptación tanto en los sondeos de investigación minera, como en sondeos de petróleo.

1.9. PERFORACIÓN CON LÍQUIDOS AIREADOS

En este método, junto con el aire se procede a inyectar en el sondeo determinadas cantidades de agua o de lodo.

Trabajando con líquido aireado, se puede variar ampliamente la presión hidrostática durante la perforación, lo que se consigue variando las proporciones de líquido y aire inyectados.

La utilización del líquido aireado permite perforar con éxito terrenos permeables, fuertemente agrietados y que se caracterizan por bajas presiones hidrostáticas. La perforación de estas formaciones es sumamente difícil tanto con lodos (pérdidas totales de lodos) como con aire, ya que éste provoca en el proceso del aforo la aparición de grandes cantidades de agua que dificultan el trabajo del compresor.

El peso específico medio de la mezcla líquido-aire, debido a que el aire ocupa un

menor volumen bajo presión, es mayor que el peso específico medio de la mezcla ascendente por el espacio anular. Por esto la presión en el compresor y en la bomba, a excepción del momento inicial mientras se establece la circulación en el pozo, es generalmente menor que cuando se perfora solamente con agua o lodo. No obstante, en la perforación con líquido aireado, la cantidad de aire y líquido inyectado es menor que cuando se perfora utilizando cada uno de estos componentes por separado.

El líquido aireado se caracteriza por la siguiente ecuación $W = Q_a / Q_1$, donde:

Q_a = cantidad de aire en metros cúbicos por minuto que proporciona el compresor.

Q_1 = cantidad de agua que inyecta la bomba, m³/min.

W = grado de aireación que determina la presión de la columna de líquido aireado sobre las paredes del sondeo.

Por ahora no existe un método de cálculo suficientemente elemental para determinar la relación líquido / aire que se debe inyectar en un sondeo para cada caso concreto. Al comenzar la operación, la inyección del líquido debe ser la suficiente para efectuar la limpieza del sondeo, disminuyéndola al establecerse la circulación y aumentando simultáneamente la cantidad de aire inyectado.

1.10. INTERRELACIÓN ENTRE LOS COMPONENTES DEL RÉGIMEN DE PERFORACIÓN

Una vez se ha seleccionado correctamente el tipo de útil y se ha comprobado que la correlación de los otros tres componentes del régimen de perforación es la adecuada, no se debe variar la significación de uno de los componentes sin paralelamente modificar los restantes siempre que se desee conservar la estabilidad de la correlación de éstos y aumentar la velocidad de avance.

A modo de ejemplo:

- Si al existir una combinación estable de los componentes del régimen de perforación se aumenta la presión sobre el útil o la cantidad de revoluciones del mismo, o los dos factores a la vez pero sin variar correspondientemente el caudal del líquido inyectado, la velocidad de avance disminuye, ya que el caudal de la bomba no será el suficiente para limpiar el pozo del detritus acumulado.

- En rocas blandas un aumento razonable del caudal y de la velocidad del líquido de perforación incrementa el avance independientemente de la variación o no de la velocidad de rotación y de la presión sobre el útil.
- Al perforar en terreno blando, lo fundamental para obtener una elevada velocidad de avance es una mayor velocidad de rotación así como un gran caudal y velocidad del líquido de perforación de manera que sea suficiente para limpiar el sondeo y no tener que estar reperformando el detritus.

Al analizar los regímenes de perforación para los tipos fundamentales de terrenos debe asegurarse que el lodo empleado tiene las cualidades adecuadas que aseguran el mantenimiento de las paredes del sondeo.

El aumento o disminución de la carga sobre el útil debe ser proporcional a su diámetro. La velocidad angular del útil varía al variar la velocidad de rotación. El caudal de la bomba varía proporcionalmente al cuadrado del diámetro del sondeo.

1.11. OTROS ASPECTOS A CONSIDERAR EN LA FASE DE DISEÑO

Además de las cuestiones analizadas anteriormente es preciso definir en la etapa de proyecto el esquema constructivo del pozo y toda la secuencia de operaciones de perforación, entubaciones auxiliares, reducciones del diámetro de perforación, etc.

Durante la ejecución de la obra se irán adaptando todos estos parámetros de manera acorde con los resultados que se vayan obteniendo. En la fase de proyecto es necesario considerar todos los aspectos de seguridad y salud que se recogerán en el Documento de Plan de Seguridad y Salud que se debe presentar a la autoridad competente conjuntamente con el proyecto constructivo para su aprobación previa al comienzo de las obras.

En el proyecto debe figurar un cronograma de operaciones, desglosado según las distintas actividades con el fin de adaptar y controlar la ejecución de las obras al plazo previsto. Una vez definido el sistema de perforación y el esquema constructivo, se está en condiciones de definir en el proyecto el tipo de maquinaria que se requiere para la realización de la obra, lo que permitirá disponer de un criterio técnico para la selección de la empresa contratista que realizará la perforación.



2. INGENIERÍA DE LAS ETAPAS DE PROYECTO Y ASISTENCIA TÉCNICA A OBRA

Dentro de la planificación necesaria para la construcción de sondeos de explotación e investigación, se deben tener en cuenta una serie de actuaciones que se describen a continuación:

- Elaboración del proyecto constructivo.
- Gestión de permisos y tramitación de documentación.
- Nombramiento de la Dirección Técnica de la obra.
- Asistencia a la contratación.
- Supervisión de los sistemas de aseguramiento y control de calidad establecidos por la empresa adjudicataria de la construcción de los sondeos piezométricos.
- Seguimiento y control en la construcción de los sondeos (ejecución de la obra).
- Correcta instalación de las prestaciones previstas en el estudio de Seguridad y Salud
- Redacción de documentación técnica y administrativa que se precise (informes, dictámenes, actas, etc.).
- Participación en reuniones y gestiones
- Comprobación de la calidad, medición y evaluación cuantitativa, cualitativa y constructiva de la obra realizada, así como de la eficiencia de la captación.
- Realización del informe final.

Todas estas etapas son comunes tanto para sondeos de captación de agua como para sondeos de investigación hidrogeológica, a excepción de la evaluación de la captación que sólo se realiza, de forma parcial, en algunos sondeos de investigación. Antes del comienzo de la obra es necesario elaborar un cronograma donde se presente el desarrollo de los trabajos en función del tiempo.

Para el correcto desarrollo de ésta etapa, se requiere un equipo técnico idóneo, con acreditada experiencia en todas las especialidades requeridas y amplios conocimientos, así como disponer de todos los medios auxiliares necesarios y que éstos se encuentren en funcionamiento desde el mismo día de inicio de los trabajos.

2.1. ELABORACIÓN DEL PROYECTO CONSTRUCTIVO DE LA OBRA

La elaboración del proyecto constructivo de la obra constituye, desde el punto de vista técnico, una etapa fundamental en toda obra de pozos o sondeos, a la vez que su presentación ante las autoridades competentes es un requisito legal y trámite necesario para la obtención de los permisos oportunos.

Este proyecto es la referencia que permitirá el diseño y un control efectivo sobre la calidad constructiva de los pozos y sondeos. La base para la realización de todo proyecto constructivo es el estudio hidrogeológico y demás estudios técnicos previos, de donde se obtienen datos fundamentales para el diseño de la construcción.



2.2. GESTIÓN DE PERMISOS Y TRAMITACIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN

Todas las obras constructivas de pozos y sondeos están reguladas y sometidas a requisitos legales entre los que se encuentran, además de la realización de un proyecto constructivo, el nombramiento de una Director Facultativa, la obtención de permisos de carácter privado y público, y la presentación ante distintos Organismos Públicos competentes de diversa documentación. La ausencia de los proyectos o de los correspondientes permisos supone automáticamente el carácter ilegal de la obra, lo que a su vez puede dar lugar a la paralización de la misma e imposición de multas, sin perjuicio de la eventual inmovilización de la maquinaria de perforación.

2.3. LA FIGURA DEL DIRECTOR TÉCNICO DE LA OBRA

La Dirección Técnica de la obra es fundamental para garantizar la correcta ejecución de la obra y estará formada al menos por:

- Un Director Facultativo.
- Personal especialista destacado en campo y en obra.
- Un Responsable de Seguridad, ya que la Dirección Técnica debe velar también por el cumplimiento de las normas de seguridad y salud y de protección medioambiental.

2.4. EJECUCIÓN DE LAS OBRAS

La ejecución de un sondeo se compone de las siguientes etapas sucesivas:

- Perforación.
- Testificación geofísica
- Acondicionamiento:
 - Entubación, destinada a:
 - Evitar el desprendimiento de las paredes del sondeo.
 - Aislar las diferentes capas del terreno para focalizar la extracción en los niveles freáticos.
 - Engravillado.
 - Cementación.
- Limpieza y desarrollo.
- Protección sanitaria.
- Terminación y cierre.

En el caso de sondeos de investigación en muchos casos no se realizan todas las operaciones anteriormente descritas.

2.5. EVALUACIÓN CUANTITATIVA, CUALITATIVA Y CONSTRUCTIVA DE LA OBRA

Una vez realizada la captación se procede a su evaluación desde el punto de vista de cantidad y calidad de agua. Esta evaluación se efectúa mediante un ensayo de bombeo o aforo. También se realiza un control constructivo con el empleo de un registro óptico de video.

Desde el punto de vista cuantitativo el aforo de la captación permite conocer el rendimiento de la captación y aporta los datos del diseño el equipamiento electromecánico de la misma. Esta prueba de producción de la captación establece la curva de respuesta caudal (Q) - Altura de impulsión (H) del sistema. De esta forma se pueden diseñar los equipos de bombeo adecuados para la extracción de agua en la captación. Estos ensayos de bombeo se realizan habitualmente con bombas sumergibles que son las que generalmente se utilizan en pozos y sondeos para captación de agua.

En estos ensayos también se obtienen datos muy importantes de los parámetros de hidrodinámica subterránea dentro del acuífero explotado como son la permeabilidad, coeficiente de almacenamiento, transmisividad, difusividad, radio de influencia, etc.

La evaluación cualitativa de la captación se realiza mediante análisis químicos con muestras de agua tomadas en distintos momentos del aforo.

2.6. ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LAS OBRAS

Desde el punto de vista constructivo, la Dirección Técnica de la obra es la responsable de garantizar el cumplimiento de las condiciones establecidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas y el Presupuesto. Para ello, deberá controlar que los distintos contratistas disponen de los permisos y certificaciones oportunos, de la validez de los mismos y que los trabajos se realizan conforme a las normas y códigos de buenas prácticas que sean de aplicación.

Se garantizará también que el trabajo de las entidades externas de control de calidad designadas por la Propiedad se realiza correctamente, para lo que deberá dar las facilidades y prestar los medios y ayuda oportunos.

2.7. INFORMES FINALES DE OBRA. "AS BUILT"

La última etapa en la construcción de sondeos es la realización de un Informe Final de la obra, donde se recojan todos los trabajos realizados y los resultados obtenidos. Las actividades realizadas se plasmarán en un amplio reportaje fotográfico, ordenado de forma secuencial.

En este informe deben quedar patentes las variaciones constructivas o "modificados" introducidas respecto de las características constructivas de la obra previstas en el proyecto original. En él se recogerán también todos los datos obtenidos en la evaluación de la captación y que son fundamentales para el equipamiento y puesta en servicio de la misma. No debe olvidarse que tanto éste documento como los planos "As Built" constituyen un documento de consulta fundamental sobre la obra efectuada y, por tanto, su elaboración debe tener en cuenta en todo momento dicha función.

4. PERFORACIÓN DE POZOS Y SONDEOS PARA CAPTACIÓN

1. CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE PERFORACIÓN

La elección del método de perforación dependerá de:

- La profundidad a alcanzar.
- El diámetro necesario.
- Factores geográficos como el relieve del terreno, condiciones de transporte, alejamiento del sondeo de la base de abastecimiento, etc.
- Volumen de obra y grado de concentración de los sondeos.
- Muy especialmente, de la naturaleza del terreno que vayan a ser atravesados.

Los distintos métodos utilizados para la construcción de pozos abiertos son:

- Discontinuos:
 - Métodos tradicionales (pozos manuales, totalmente en desuso).
 - Hélice discontinua.
 - Método de hinca con cuchara bivalva.
- Continuos:
 - Hélice continua.

Por su parte, los diferentes métodos de perforación usados habitualmente para la construcción de un pozo vertical (sondeo de explotación) son:

- RotoperCUSión con martillo en fondo.
- Percusión.
- Rotación:
 - Con circulación directa.
 - Con circulación inversa.

El método de percusión se utiliza principalmente en terrenos de rocas compactas, friables y de dureza media, así como en formaciones fisuradas, susceptibles de originar excesivas pérdidas de los lodos y de forma continua si se perforaran a rotación.

La perforación a rotación es generalmente recomendable para terrenos incoherentes y en aquellas situaciones en las que la roca, aunque presente una elevada dureza, tenga poca fragilidad. Los sistemas a rotación consumen más agua durante la perforación que la percusión y necesitan un lavado más enérgico de los pozos una vez construidos, además de precisar de sondistas más expertos.

2. EXCAVACIÓN DE POZOS ABIERTOS

Los sistemas continuos que se utilizan para pozos abiertos se basan en el empleo de medios mecánicos para la extracción del terreno perforado, mientras que los correspondientes a sondeos de explotación (o de investigación) se basan en el empleo de fluidos de perforación que transportan las partículas sólidas.

Es de destacar que todos los métodos de perforación para captaciones de agua son métodos destructivos del terreno atravesado y que durante su realización solo es posible ir tomando muestras del “detritus” extraído para el control de la columna litológica atravesada. Por ello es imprescindible que en todos los pozos se realicen registros de testificación geofísica con carácter previo a la entubación para un correcto diseño de los tramos filtrantes de la tubería de revestimiento. Ambas operaciones deben ser supervisadas por especialistas en hidrogeología de la Asistencia Técnica a la Dirección de Obra.

En general las características constructivas de este tipo de captaciones son las siguientes:

- Se realizan en terrenos blandos detríticos que constituyen acuíferos superficiales (aluviales, eluviales, etc.).
- Sus características geométricas vienen definidas por su gran diámetro (superior a 1 metro) y su limitada longitud (30-40 metros).
- Utilizan maquinaria de perforación muy relacionada con tecnologías empleadas en la obra civil para realizar cimentaciones.

2.1. MÉTODO DE HÉLICE

La perforación en el subsuelo por este sistema se efectúa comunicando a la herramienta una velocidad de giro, una presión en cabeza y un par de rotación. La diferencia entre la hélice continua y la discontinua radica, como ya se ha indicado en el apartado anterior, en la necesidad de parar la perforación o no para la extracción del terreno atravesado.

Los equipos de hélice van montados sobre camión y, además de para realizar pozos abiertos, es frecuente su empleo como método auxiliar en la perforación de sondeos profundos, para atravesar formaciones superficiales inestables y poco consolidadas (aluviales, etc.), o bien como aplicación específica a algún método de perforación como es la rotación a circulación inversa.

El sistema de hélice continua se aplica fundamentalmente en obra civil y en minería (con aplicaciones en investigación de graveras), pero realmente poca aplicación en obras de captación de aguas subterráneas. Su utilización principal está asociada a apoyo de la perforación de sondeos a circulación inversa, permitiendo perforar los primeros metros y alcanzar la profundidad suficiente para poder utilizar el circuito de aire para extracción de detritus.

El sistema de hélice discontinua es, por el contrario, el que más se utiliza para la construcción de pozos abiertos, permitiendo un mayor diámetro de perforación al aplicar toda la acción del par motor en una menor longitud de herramienta de corte.

En pozos para agua construidos por el sistema de hélice discontinua se emplea habitualmente el método de hinca. En este sistema la entubación del pozo se realiza simultáneamente a la perforación mediante el empleo de anillos de hormigón que descienden al interior del sondeo por su propio peso al ser socavado o descalzado el terreno infrayacente a los sucesivos anillos de hormigón, por la acción del útil cortante que actúa por el interior de los mismos. Generalmente la perforación finaliza cuando se equilibra la fuerza del peso de los anillos de hormigón con su rozamiento lateral con las paredes del pozo (en la práctica, del orden de uno 20-30 metros).

2.2. SISTEMA DE CUCHARA BIVALVA

También es frecuente la perforación de pozos abiertos con el empleo de cuchara bivalva. Análogamente al sistema de hélice discontinua, la entubación se realiza con anillos de hormigón por el método de hinca de tubos.

La ventaja que presenta el método de hincas de anillos de hormigón tanto con hélice discontinua como con cuchara bivalva es la rapidez de ejecución, puesto que en menos de una jornada de trabajo puede quedar construida una captación en un aluvial que a veces llega a proporcionar un gran caudal de agua y con una capacidad adicional de almacenamiento en función de su gran diámetro.

Su inconveniente principal es que desde un punto de vista hidrogeológico estricto, su construcción no es muy adecuada por varios motivos: en primer lugar el anillo de hormigón queda muy próximo a la superficie del terreno y por tanto la captación en un acuífero detrítico no dispondrá de un macizo de grava filtrante de espesor adecuado.

Por otra parte los pasos de agua al pozo se producen de forma localizada y no por todo el contorno de la captación. Por estas razones las captaciones realizadas con anillos de hormigón pueden presentar problemas de arrastres de finos con colmataciones en el propio pozo y daños a los equipos de bombeo. Estos daños pueden ser inmediatos si hay presencia de arena fina y poco consolidada en el acuífero a explotar. Además las pérdidas de carga pueden ser muy importantes por el esquema de flujo de agua subterránea, a su vez condicionado por la disposición de los orificios de entrada.

Por todo lo dicho anteriormente, el sistema de pozos abiertos con anillos de hormigón no es recomendable salvo en los supuestos de obras de emergencia (por su rapidez) o de abastecimientos de carácter local en el caso de acuíferos pobres (por su capacidad de almacenamiento).

3. PERFORACIÓN DE POZOS CON TÉCNICAS DE SONDEO

3.1. UTILIZACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ROTACIÓN

El sistema de perforación a rotación con circulación directa es el que habitualmente se emplea en los sondeos de petróleo por su capacidad para alcanzar grandes profundidades y ser el método de perforación que, en general, presenta mayor versatilidad en la realización de sondeos. Este método se encuentra muy tecnificado y su uso es también muy frecuente en investigación minera. Sin embargo, salvo en casos excepcionales, no se debe emplear en sondeos para captaciones hidrogeológicas por las razones que a continuación se detallarán y, si acaso, se

puede emplear una variante del método original, que es el de rotación a circulación inversa. En éste último caso, el sistema se basa en la utilización de un compresor que inyecta aire en el interior de la sarta por medio de un varillaje de doble pared. La inyección de este aire aligera la columna de lodo creando una depresión en el interior del varillaje que fuerza la circulación desde el espacio anular entre la pared exterior y el varillaje hacia el interior del mismo.

Entre ambos sistemas existe una diferencia fundamental que radica en que, en la circulación directa, el "detritus" de perforación sale a la superficie por el espacio anular comprendido entre la pared del sondeo y el varillaje, mientras que en la circulación inversa los recortes ascienden por el interior del varillaje. Esta diferencia condiciona el hecho de que la circulación directa no se deba aplicar para sondeos de captación de agua subterránea, y que la práctica a emplear en estos casos sea la circulación inversa. Esto se debe a que, en la práctica totalidad de los sondeos para captación de agua subterránea, el diámetro de perforación es tal que la superficie del espacio anular entre la pared del sondeo y el varillaje de perforación tiene un área mayor que la superficie interior del varillaje. Puesto que el caudal que circula por un conducto viene determinado por la expresión $Q = V \times S$ donde Q es el caudal de circulación del fluido de perforación (m^3/s) y S es la sección del conducto (m^2), resulta que para arrastrar los detritus de perforación con una velocidad "V", el caudal necesario del lodo de perforación es muy superior en circulación directa, con mayor superficie de paso, que en circulación inversa. Consecuentemente, se requerirían bombas de impulsión de lodos dimensionadas con capacidades muy importantes, lo que supondría el empleo de equipos con elevadas potencias instaladas que superan las capacidades de los equipos de perforación que habitualmente se emplean para captación de agua.

La práctica a la que recurren los perforistas de circulación directa es la de emplear lodos artificiales preparados a partir de arcillas del tipo bentonita que aumentan notablemente la densidad y viscosidad y que, por tanto, presentan capacidades de arrastre de sólidos mayores frente a los lodos naturales y permiten trabajar con velocidades más bajas de circulación del fluido de perforación. Ahora bien, trabajar con lodos bentoníticos para la realización de un sondeo supone que durante la realización de una perforación para captación de aguas subterráneas se está inyectando un agente arcilloso que impermeabiliza el terreno que atraviesa la sarta de perforación, por lo que las captaciones así construidas tendrán un rendimiento posiblemente muy inferior al previsto en cuanto a obtención de caudales de agua y optimización de las inversiones realizadas en la obra de captación de agua subterránea.

De forma resumida, puede afirmarse que el método de perforación a circulación inversa presenta las siguientes ventajas comparativas respecto de la circulación directa:

- Permite perforar con un mayor diámetro de perforación sin empleo de lodos bentoníticos.
- Se obtienen muestras más representativas del terreno atravesado puesto que al ser la velocidad ascensional más elevada, existe un desfase de tiempo menor entre el momento de la perforación y su ascenso a superficie. Además en circulación directa la muestra obtenida se contamina con el terreno de la pared del sondeo según va ascendiendo.
- Las paredes del sondeo sufren una menor erosión pues las partículas son extraídas por el interior del varillaje
- Menor coste energético al ser la potencia a emplear inferior.

A pesar de estos inconvenientes es preciso indicar que pese a que la circulación directa no debe emplearse en el caso de sondeos para captaciones hidrogeológicas es el método que habitualmente se utiliza en investigación petrolífera y minera donde no importa el uso de lodos bentoníticos y además se dispone de equipos de impulsión muy dimensionados. Esta utilización se fundamenta en la gran capacidad del método de circulación directa para la perforación de sondeos en general.

Esta facultad de la circulación directa se basa precisamente en el empleo de lodos bentoníticos que permiten estabilizar adecuadamente las paredes. Además a estos lodos se les puede añadir, en su caso, una gran cantidad de aditivos para hacer frente a problemas específicos como es la pérdida de circulación y otras complicaciones del sondeo. Entre estos aditivos se encuentran los agentes densificantes, fluidificantes, colmatantes, descolmatantes, etc.

En el sector de las perforaciones para captación de agua, el montaje del chasis en el que van todos estos elementos suele realizarse sobre camión para un traslado más ágil. También es frecuente la utilización de cabezales de rotación en lugar de mesas de rotación, obteniéndose unos rendimientos sensiblemente superiores y del orden de 50-60 metros/día, frente a 15-20 m/día con el empleo de mesa de rotación con accionamiento mecánico.

El sistema de extracción de la sarta de perforación es el que limita la capacidad de perforación del equipo. En la actualidad, por razones económicas, los equipos de mayor capacidad de perforación a circulación inversa existentes en el mercado se sitúan en profundidades máximas de 600-800 metros en terrenos blandos. Este tipo de terrenos requieren un menor peso de las barras de carga que actúan sobre el tricono, por lo que la capacidad de tiro de los equipos puede emplearse en la

extracción de una mayor longitud de varillaje de perforación, lo que permite realizar pozos de mayor profundidad.

Durante la realización de un sondeo por el método de rotación a circulación inversa no es posible obtener información sobre los niveles piezométricos y la calidad del agua del acuífero explotado, dado que el nivel de agua observado en el interior del sondeo es el de la balsa y el agua es mezcla, en proporción variable, entre la aportada a la perforación y la del acuífero atravesado. Por el contrario, con este método de perforación sí se obtiene una buena información litológica del terreno atravesado puesto que los recortes obtenidos ascienden a gran velocidad por el interior del varillaje de perforación por lo que el desfase es muy pequeño y además no hay contaminación con el material de las paredes del sondeo.

El método de perforación a circulación inversa es ideal para efectuar obras de captación hidrogeológica en formaciones no consolidadas (arenas, limos, arcillas, etc.) con elevados rendimientos. Este tipo de terrenos corresponde a las grandes áreas detríticas españolas como son las cuencas del Duero, Tajo y Guadalquivir. Por este sistema, llevando un adecuado control del peso sobre el tricono, es posible garantizar la verticalidad del pozo dentro de unos límites admisibles.

Este sistema no es recomendable a partir de materiales de dureza media (calizas, dolomías, areniscas compactadas, etc.) debido a que las capacidades de extracción de los equipos convencionales empleados para la captación de aguas no permiten utilizar las barras de carga con peso suficiente y acordes con la dureza del terreno a perforar. En este caso es más conveniente el empleo de otros sistemas de perforación como el de percusión o rotopercusión.

Un inconveniente importante que presenta este método es que, incluso en el caso de terrenos blandos, no se debe emplear en formaciones que sean muy permeables y/o muy inestables, características que en la práctica suelen aparecer conjuntamente. Si las formaciones son muy permeables se producen grandes pérdidas del lodo de perforación y descenso de los niveles del mismo en el sondeo con el peligro de hundimiento de la obra. Cuando los terrenos son muy inconsistentes causan problemas de estabilidad de las paredes de los sondeos con frecuentes derrumbes.

Debido a las pérdidas de lodo tampoco el sistema es apropiado en el caso de perforación de zonas no saturadas en acuíferos calcáreos karstificados. Estos problemas en circulación directa suelen ser solventados con el empleo de aditivos añadidos a los lodos bentoníticos. Sin embargo la capacidad de respuesta en circulación inversa es muy limitada y, frente a los problemas anteriores, hay que pensar en realizar entubaciones auxiliares que complican la realización de la obra pues implican reducciones de los diámetros de perforación previstos que pueden

comprometer la instalación de los equipos de bombeo diseñados. Al utilizar tubería auxiliar existe también la posibilidad de no poder recuperar estas tuberías que son ciegas y que sellarían zonas productivas. Por otra parte la operación de entubación auxiliar no garantiza que algunos metros de perforación más abajo de la entubación vuelva a producirse el mismo problema.

Cuando se producen pérdidas de lodos otra alternativa frente la entubación es la cementación, que permite mantener el diámetro del pozo, pero es una operación laboriosa, con resultados a veces inciertos, que dilatan enormemente los ritmos de perforación.

3.2. UTILIZACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ROTOPERCUSIÓN

El método de rotopercusión neumática con martillo en fondo es el sistema de perforación más moderno de todos los que se utilizan en la perforación de sondeos para captación de aguas subterráneas. Este sistema surgió a partir de las técnicas de perforación empleadas en las explotaciones mineras de exterior para la perforación de barrenos para voladuras. Análogamente al sistema de rotación en la rotopercusión se emplean dos modalidades, la rotopercusión directa y la rotopercusión inversa con gran diámetro, cuyas denominaciones se basan en criterios coincidentes con los correspondientes a los de la rotación en cuanto al sentido de circulación del fluido de perforación, el aire en rotopercusión, por el interior del varillaje. A diferencia de la rotación ambas modalidades se pueden emplear para la perforación de captaciones hidrogeológicas.

El sistema que se emplea habitualmente es la rotopercusión directa, pues por el sistema a rotopercusión inversa con gran diámetro, aunque es el más moderno de todos los métodos para captación de agua subterránea, existen todavía muy pocos equipos en España que operen con esta tecnología. Las prestaciones para las captaciones hidrogeológicas de los equipos de rotopercusión inversa con pequeño diámetro son inferiores a las de los equipos a circulación directa en cuanto a diámetros y similares en cuanto a profundidades.

En la práctica, la rotopercusión con circulación directa, que es la técnica que se emplea más habitualmente, está muy condicionada en cuanto al diámetro de perforación pues el ascenso de los recortes por el anular entre el varillaje y la pared del sondeo limita las posibilidades de los compresores empleados dado el requerimiento de caudal de aire. Es posible paliar esta carencia mediante la utilización de dos compresores conectados en paralelo mediante un sistema tipo "Y" que permitan aumentar el caudal de aire manteniendo la presión de los compresores conectados.

La rotopercusión a circulación inversa con gran diámetro, de la que no existen muchas experiencias en España, permite obtener mayores diámetros de perforación que en circulación directa con otras ventajas añadidas, algunas de las cuales ya se han comentado para el caso de la rotación, como son:

- Obtener muestras del terreno y de agua más representativas evitando desfases y contaminaciones con la pared del sondeo al extraerse el detritus de perforación por el interior del varillaje.
- Las paredes del sondeo sufren una menor erosión que en circulación directa pues se evita que el aire de perforación actúe sobre los estratos más blandos del sondeo erosionándolos y provocando hundimientos.
- Se evitan las pérdidas de aire que, en el caso de circulación directa, puede suponer la caída de materiales con peligro de atrapamiento del martillo de perforación.

El sistema de rotopercusión es el procedimiento más adecuado desde el punto de vista de la información hidrogeológica que se obtiene durante la realización de la perforación, puesto que con la circulación del aire que suministra el compresor se efectúa un bombeo del agua existente en el interior del sondeo y que es aportada por los niveles acuíferos atravesados.

De esta forma este sistema es el único que permite "a priori" una estimación de los caudales de agua subterránea a extraer de la captación antes de la finalización de la perforación, pudiendo tomar decisiones a la vista de los resultados sobre la conveniencia del ensanche y entubación del sondeo o incluso de la necesidad de realizar pozos con gran diámetro por otros sistemas, como la percusión.

También es posible obtener muestras de agua del acuífero a explotar y se puede proceder a realizar medidas "in situ" e incluso análisis que permitan conocer la hidroquímica del agua del agua y detectar, en su caso, problemas tales como contaminaciones o calidades inadecuadas para los usos previstos. Sobre la base de esta información se pueden tomar decisiones sobre el diseño final de la captación.

Como en el caso del sistema de rotación, la información litológica que se obtiene por el método de circulación inversa es mejor que la aportada en la circulación directa puesto que en circulación inversa los desfases son pequeños y no existen contaminaciones con las paredes de la perforación. Esta es la razón de que en investigación minera se utilice este sistema, con pequeño diámetro, con el objeto de obtener muestras representativas.

La capacidad de perforación en terrenos inestables es mayor en perforación a rotopercusión que en circulación inversa. No obstante el precio de perforación a circulación directa es muy inferior, al disponerse de mayor número de equipos en el mercado. En teoría el sistema de rotopercusión inversa presenta claras ventajas sobre la rotopercusión directa cuando aumenta el diámetro y la profundidad del sondeo.

El sistema de rotopercusión tiene la gran ventaja de la rapidez de ejecución de las perforaciones y de ser el sistema que permite obtener una mayor información hidrogeológica durante la realización de los sondeos. Puesto que por este sistema se obtienen rendimientos que superan los 80 m/día se puede saber muy rápidamente si una determinada perforación es adecuada como captación hidrogeológica.

En la práctica se suele comenzar perforando con un diámetro de investigación de 220 mm y si se comprueba que los resultados son positivos se procede a su ensanche y posterior entubación. En caso negativo, además de obtener esta información con un coste económico mínimo, se da por finalizada la perforación sin proceder a su ensanche ni entubación. Es decir la propia realización de la captación constituye una etapa más de la investigación hidrogeológica.

Este método de perforación, junto con la percusión, es el sistema más adecuado para rocas duras. En el caso de calizas carstificadas la pérdida de aire por las cavidades puede ser un problema si el aire no arrastra el "detritus" y por tanto quedan depositados en el fondo de la perforación.

El método de rotopercusión es el único recomendable para abastecimientos puntuales que se localicen en formaciones muy duras y con pocas posibilidades para la extracción de agua. Entre este tipo de formaciones se encuentran las rocas ígneas y las metamórficas, que son zonas desfavorables para la captación de aguas subterráneas.

El inconveniente fundamental de utilizar la rotopercusión como método para realizar captaciones hidrogeológicas radica en el hecho de que este sistema tiene su funcionamiento óptimo en aquellas circunstancias que no son favorables desde el punto de vista hidrogeológico: terrenos duros, consistentes y con poca presencia de agua.

Otra limitación del sistema de rotopercusión es que este método tiene poca capacidad de respuesta frente a los problemas que surgen en el sondeo durante su construcción, especialmente en terrenos sueltos (hundimientos, agarres, etc.). Esta característica viene determinada por las propiedades del fluido empleado que

presenta unas bajas posibilidades de estabilización de las paredes de la perforación. Incluso la utilización del aire como fluido de perforación agrava el problema de la inestabilidad de las paredes del sondeo al provocar su erosión, debido a su elevada velocidad de circulación.

Además en terrenos sueltos la rotopercusión no es el sistema de perforación más adecuado debido a la baja efectividad del golpeo del martillo en terrenos blandos. Por otra parte las captaciones hidrogeológicas realizadas en estas formaciones requieren el acondicionamiento de empaques de grava que no pueden efectuarse con las limitaciones de diámetro del sistema de rotopercusión, al menos en circulación directa.

En el sistema de rotopercusión no se suele controlar la distribución de esfuerzos en la sarta de perforación como en el caso del sistema a rotación, garantizando el trabajo a tracción de una parte importante de la sarta, por lo que es muy frecuente tener problemas con la verticalidad del sondeo, especialmente en el caso de formaciones heterogéneas que presenten buzamientos. Las desviaciones que se produzcan en la perforación de una captación hidrogeológica pueden comprometer su posterior entubación y equipamiento electromecánico. La única forma de poder disminuir la desviación del sondeo es limitar la presión transmitida en cabeza a la sarta de perforación, aún a costa de tener un menor rendimiento en la perforación.

Finalmente cabe destacar que los equipos de perforación a rotopercusión tienen un coste económico elevado y los consumibles son muy altos.

3.3. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE PERFORACIÓN

A título meramente orientativo, se pueden establecer unos criterios o recomendaciones generales para la elección del sistema de perforación más adecuado para una determinada captación hidrogeológica. Aunque son muchos los factores a considerar en ésta selección, se puede obtener una aproximación suficientemente precisa considerando parámetros como la litología (dureza, en función de la resistencia a compresión), la profundidad y el diámetro de perforación. Respecto a la clasificación de diámetros como “grande” o “pequeño”, se puede fijar en unos 300 mm el diámetro límite entre ambos. Análogamente en lo referente a la longitud de la captación la barrera entre captación superficial y profunda se puede establecer en unos 100 m.

A continuación se describen los distintos criterios a considerar para cada tipo de roca:

3.3.1. Rocas muy duras

Considerando como rocas muy duras a aquellas cuya resistencia a compresión es superior a 2.000 Kp/cm² (por ejemplo, pizarras, cuarcitas, granitos, basaltos, etc.), se trata de un conjunto de rocas caracterizadas también por su consistencia y por sus escasos aportes de agua a las captaciones. El método más adecuado es el de rotopercusión con circulación directa. Además, se trata de formaciones en las que por sus menores capacidades hidrogeológicas, no se suelen realizar captaciones de gran diámetro o profundidad.

3.3.2. Rocas duras

En este grupo se incluyen las rocas con resistencias a compresión comprendidas entre 800 y 2.000 Kp/cm² (calizas y areniscas duras por ejemplo). Los sistemas de perforación aplicables son los de rotopercusión y percusión. Si el diámetro es pequeño la perforación se realizará a rotopercusión directa o inversa, puesto que en la técnica de percusión los trépanos que habitualmente utilizan los equipos disponibles en el mercado suelen ser de diámetros iguales o superiores a 400 mm. Si se trata de mayores diámetros en el caso de sondeos poco profundos se pueden utilizar básicamente tanto el método de percusión como de rotopercusión directa.

También podría plantearse el empleo de la rotopercusión inversa, si bien el empleo de este sistema supone unos costes de puesta en obra que probablemente no sean asumibles para sondeos cortos en la mayoría de los casos.

Si tratándose de captaciones de diámetro grande, los sondeos son más profundos, hay que pensar en la percusión aun con el inconveniente de su lentitud, lo que implica periodos de tiempo muy elevados para la ejecución de la captación. Otra alternativa es la rotopercusión inversa con gran diámetro, pero cuya problemática corresponde a sus elevados costes y una cierta incertidumbre en sus resultados al ser una práctica de empleo poco frecuente.

3.3.3. Rocas de dureza media

En este grupo quedan incluidas las rocas con resistencias a compresión comprendidas entre 200 y 800 Kp/cm² (es el caso de las calizas y areniscas). Siendo

aplicable lo señalado en el apartado anterior, cabe también la posibilidad de utilizar la rotación a circulación inversa siempre que se haga tomando las debidas precauciones en función de la consistencia y dureza de la roca.

3.3.4. Rocas blandas

Este grupo se refiere a las rocas o formaciones que presentan resistencias a compresión inferiores a 200 Kp/cm² (las arenas, limos, arcillas y margas, entre otras). En éste caso, la construcción de captaciones de gran diámetro y profundidad siempre inferior a 30 m, se suele hacer en la modalidad de pozo abierto, mientras que si la profundidad aumenta, se debería acudir a sondeos de rotoperCUSión con circulación inversa. En el caso de pequeños diámetros, lo más adecuado es considerar la rotación a circulación inversa.

3.3.5. Rocas de diversa naturaleza y consistencia

Cuando el sondeo atraviese distintas formaciones, será preciso realizar un análisis global que permita una solución óptima, compatibilizando todos los criterios anteriores. Así, en muchos casos es necesario el empleo de sistemas de perforación mixtos, definiéndose un método de perforación hasta una determinada profundidad y continuándose el sondeo por otra técnica, en función de la litología. Finalmente, una vez seleccionado el método de perforación más adecuado y considerando las características geométricas en cuanto a profundidad y diámetro del sondeo, se puede proceder a la estimación de las capacidades requeridas de los equipos de perforación y elementos auxiliares para, conjuntamente con otros criterios como el económico, proceder a seleccionar a la compañía de perforación más adecuada que lleve a cabo la ejecución de la captación.

Es de destacar que la última tendencia de los fabricantes de equipos de perforación para captaciones de agua subterránea es la de poner en el mercado equipos multisistema que disponen de compresores, varillaje liso, varillaje de doble pared, etc., de manera que puedan realizar perforaciones mixtas tanto a rotación a circulación inversa como a rotoperCUSión con un mismo equipo.

RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO DE SELECCIÓN DEL MÉTODO DE PERFORACIÓN PARA CAPTACIONES HIDROGEOLÓGICAS				
DUREZA	EJEMPLO DE LITOLOGÍA	DIÁMETRO	CAPTACIÓN SUPERFICIAL (<100m)	CAPTACIÓN PROFUNDA
MUY DURA Resistencia a compresión >2.000 Kp/cm ²	Pizarras Cuarcitas Granitos Basaltos	Grande	X	X
		Pequeño (<300 mm)	RotoperCUSión con circulación directa	X
DURA Resistencia a compresión entre 800-2.000 Kp/cm ²	Calizas duras Areniscas duras	Grande	RotoperCUSión con circulación directa (¿inversa?)	RotoperCUSión con circulación inversa
		Pequeño (<300 mm)	RotoperCUSión con circulación directa	RotoperCUSión con circulación directa (¿inversa?)
MEDIA Resistencia a compresión entre 200-800 Kp/cm ²	Calizas Areniscas	Grande	RotoperCUSión con circulación directa (¿inversa?) ¿Rotación a circulación inversa?	RotoperCUSión con circulación inversa ¿Rotación a circulación inversa?
		Pequeño (<300 mm)	RotoperCUSión con circulación directa ¿Rotación a circulación inversa?	RotoperCUSión con circulación directa (¿inversa?) ¿Rotación a circulación inversa?
BLANDA Resistencia a compresión < 200 Kp/cm ²	Arenas Limos Margas Arcillas	Grande	Pozos abierto Percusión Rotación a circulación inversa	Percusión Rotación a circulación inversa
		Pequeño (<300 mm)	Rotación a circulación inversa	Rotación a circulación inversa

Fuente: García Ruiz, T. (2009).

5. CONSTRUCCIÓN DE LOS SONDEOS DE CAPTACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

La construcción de los sondeos de captación se efectúa de acuerdo con una serie de etapas que se describen en este capítulo y que deben realizarse secuenciada y correctamente a fin de poder garantizar la calidad de la obra de captación.

2. SITUACIÓN DE LOS SONDEOS

Los sondeos se llevarán a cabo en los puntos previstos y en donde los datos obtenidos de los estudios previos permitan asegurar que cumplirán correctamente su función. La posición exacta de los sondeos se determinará:

- Por métodos topográficos clásicos, debiendo quedar localizados por referencias a puntos fijos bien identificados. En este caso, la cota será determinada por nivelación geométrica.
- Por medio de sistemas de posicionamiento por satélite GPS. En éste caso, la precisión debe ser centimétrica.

En los lugares a perforar:

- Tendrán señalizada el área de trabajo y dispondrán de las medidas de seguridad oportunas.
- Se tendrá garantizado el mantenimiento de la limpieza del área de trabajo.
- Se respetarán las normas de seguridad en las diferentes maniobras y la utilización de los E.P.I. (equipos de protección individual) por parte de los sondistas y demás personal destacado en obra.



- Se pondrá especial atención en la delimitación del perímetro del área de trabajo para evitar la entrada a personal ajeno a los trabajos o que no disponga de las medidas de protección reglamentarias.
- Se observará que el material esté en todo momento en buenas condiciones, con objeto de evitar accidentes o incidentes y conseguir que los resultados obtenidos sean del todo fiables.

3. PREPARACIÓN DE ACCESOS Y EMPLAZAMIENTO DE LOS EQUIPOS

Una vez obtenidos los permisos y autorizaciones necesarias, se procederá a la preparación del acceso que utilizarán tanto la maquinaria como los vehículos de servicio y aprovisionamiento. Se construirá una pista adaptada a la circulación de los mismos en condiciones de absoluta seguridad y se procederá también al acondicionamiento del emplazamiento de la maquinaria principal y auxiliar, casetas de obra y servicios que sean necesarias y las zonas de acopios.

El criterio de diseño de estas obras será el de facilitar la realización de los trabajos y, al mismo tiempo, facilitar su posterior desmantelamiento una vez concluidas las obras y garantizar la restauración posterior del emplazamiento. Se debe garantizar por tanto la realización de los mínimos daños posibles. El recinto de trabajo debe ser convenientemente acotado y señalizado con el fin de evitar accidentes por acceso de personal ajeno a la obra o, en su caso, animales sueltos.

La pista de acceso de la maquinaria debe ser de anchura adecuada y, al menos, 1,5 veces la anchura de la máquina más grande y contar con la pendiente adecuada a las características mecánicas del vehículo portador. La superficie del terreno debe ser lo más llana posible y en el punto de posicionamiento de la máquina, el suelo debe ser lo más horizontal posible y con la suficiente capacidad portante para verificar así que el mástil del equipo de perforación está colocado verticalmente, antes del comienzo de la perforación. De esta forma se evitan posibles accidentes, así como problemas con la sarta de perforación y efectos de desvío de la trayectoria del sondeo durante la perforación.

En las inmediaciones del sondeo es necesario habilitar una zona de descarga y acopio de materiales, que permita colocar de forma adecuada los distintos materiales y equipos que se utilizarán para la construcción del sondeo (tuberías, grava, cemento, impermeabilizantes, combustibles, aceites, etc.). Es cada vez más frecuente que se exija proteger la superficie del suelo mediante material impermeable y telas adsorbentes con el fin de evitar impactos sobre el medio que puedan ser debidos a derrames y vertidos. También será necesario preparar una balsa una balsa para recogida de detritus. Si el método a emplear es el rotación a circulación inversa es necesario también proceder al llenado de la misma con agua.

Finalmente, no debe olvidarse que la realización de ensayos de bombeo requiere acondicionar la canalización y vertido de las aguas bombeadas, de tal manera que se evite la generación de cualquier tipo de daño o impacto en el entorno inmediato.

4. VIGILANCIA Y CONTROL DE LA PERFORACIÓN

Una vez realizado el posicionamiento de la máquina e iniciada la perforación, es necesario realizar una serie de labores de vigilancia y control de la operación como parte del programa de garantía de calidad de la obra.

Los trabajos a desarrollar se dividirán en:

- Trabajos de inspección
- Trabajos sistemáticos de control

Durante la realización de la perforación se recogerá el detritus producido, que será analizado por el personal técnico destacado a pie de obra y que podrá establecer en cada momento la columna litológica del terreno atravesado. También se llevará un riguroso control del lodo de la perforación y de los valores de los parámetros mecánicos de la perforación (peso, rotación, par, etc.), de manera que se puedan adoptar las correspondientes medidas correctoras en caso necesario.

5. ENSAYOS IN SITU Y TOMA DE MUESTRAS

5.1. TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA

La testificación geofísica tiene la doble finalidad de:

- Permitir el diseño definitivo de la columna de entubación de los pozos.
- Verificar la calidad constructiva sobre todo en lo que se refiere a la verticalidad de la perforación.

Dado que el método de perforación utilizado en la construcción de pozos de agua es destructivo, el control preciso de las formaciones atravesadas solo puede hacerse mediante una toma continua del “detritus” de perforación para su caracterización. Habitualmente se toman muestras cada metro de perforación y, para una correcta definición de la columna de entubación, los datos geológicos deben ser contrastados con la testificación geofísica para completar la información.



De manera más concreta, para la definición de la entubación, la testificación geofísica permite:

- Corregir los efectos de decalaje y de contaminación de las muestras de “detritus” de perforación que se producen en su ascenso por el pozo desde el arranque con el útil cortante.
- Obtener un registro continuo de la pared del sondeo.
- Disponer de información que corresponde también a un dominio lateral del terreno adyacente a la perforación.
- Obtener datos geológicos, hidrogeológicos y de calidad del agua subterránea.

Los datos relativos a la verticalidad de la perforación permiten comprobar que la desviación se encuentra dentro de los límites admisibles para la posterior entubación e instalación del equipamiento electromecánico del pozo. Habitualmente estos límites se suelen establecer en un desvío de 2 veces el diámetro interior de la entubación en cada 100 m de profundidad. Este límite suele corresponder en la práctica a una desviación del 1% respecto de la vertical.

La testificación geofísica se realiza una vez finalizada la perforación del sondeo y antes de proceder a la entubación del mismo. Se debe realizar lo antes posible para no poner en peligro el sondeo por paradas en la operación que puedan afectar a su estabilidad interna.

Una vez obtenidos los distintos registros se procede en obra a su análisis e interpretación, conjuntamente con los registros geológicos, y se define el diseño de la entubación, con la determinación de los tramos filtrantes del revestimiento del sondeo. Este diseño de la entubación permite garantizar el empleo de recursos económicos de la manera más racional posible, puesto que los tramos filtrantes, que son notablemente más caros que los de tubería ciega, sólo se colocarán en aquellos tramos de la columna del sondeo en los que la geofísica haya puesto de manifiesto su productividad y en los que no existan problemas de calidad química. Análogamente se podrá garantizar que no se quedan tramos productivos sin entubación filtrante, garantizando así el máximo rendimiento y producción de la obra.

El conocimiento de la desviación del sondeo y su cuantificación en función de la profundidad además de permitir conocer si la calidad de la obra se ajusta a las especificaciones contractuales, permite obtener información relativa a la problemática que se pudiera presentar a la hora de proceder a la entubación y la instalación del equipamiento electromecánico del pozo para así, según proceda, estar en disposición de tomar las medidas correctoras oportunas.

Los parámetros geofísicos que habitualmente se recogen en la testificación de un pozo para captación de agua subterránea se pueden clasificar, acorde con sus objetivos, en los siguientes grupos:

- Litología y diseño de la entubación metálica: gamma natural, potencial espontáneo y resistividad.
- Calidad del agua subterránea y modelo hidrogeológico: conductividad y temperatura del fluido (también potencial espontáneo).
- Control de la ejecución de la perforación: registro de la trayectoria de un sondeo.

En los registros geofísicos estos parámetros vienen representados en función de la profundidad del pozo. Para el análisis de estos registros de entubación se compararán los resultados geofísicos obtenidos con los del control geológico del pozo, sobre la base de la observación del “detritus” de perforación obtenido. Es frecuente observar ciertas diferencias entre los datos geofísicos y geológicos, por lo que una vez finalizada la testificación se procede, de forma inmediata y a pie de sonda, al estudio de los datos obtenidos para poder optimizar, desde un punto de

vista técnico y económico, la definición de la columna de entubación.

Con respecto a los registros de conductividad y temperatura del fluido, que también vienen dados en función de la profundidad de perforación, para que sean comparables con otros registros de conductividad de otros sondeos y con registros de conductividad de ese mismo pozo pero obtenidos en otras épocas, es necesario que se recalculen sus datos para una temperatura de fluido de 25 °C.

Finalmente, conviene señalar que la información obtenida referente a litología, conductividad y temperatura a lo largo de la profundidad de la obra proporcionan datos muy valiosos para el conocimiento del funcionamiento hidrogeológico del acuífero explotado (niveles acuíferos, zonas de circulación, gradientes geotérmicos, etc.) que permiten establecer estrategias en la gestión de los recursos hídricos subterráneos a nivel global y pautas de diseño de nuevas obras de captación en la zona.

5.2. TOMA DE MUESTRAS Y ANÁLISIS QUÍMICOS

La toma de muestras de agua en la perforación y en las distintas etapas de construcción del pozo es una faceta fundamental. Es por ello que es objeto de un capítulo específico en el que se describe de forma mucho más pormenorizada tanto las actividades a realizar como los procedimientos específicos de aplicación.

5.3. ENSAYOS DE BOMBEO

Para la ejecución de los ensayos de bombeo se efectuará una perforación de un diámetro tal que permita la colocación de tubería de al menos 200 - 250 mm de diámetro mínimo interior y un prefiltro de al menos 80 mm de espesor. El huso granulométrico de esta gravilla y la apertura del filtro se ajustarán a la naturaleza del terreno.

Cada uno de estos pozos usados para los nsayos penetrará al menos 3 m por debajo de la base del acuífero a estudiar.

Se procederá al sellado de la parte superior del pozo con mortero de cemento. Posteriormente se procederá al desarrollo del pozo mediante sobrebombeo.

Cada uno de estos pozos de bombeo llevará asociado al menos tres (3) o cuatro (4)

piezómetros según las circunstancias y objetivos del ensayo. Los ensayos constarán de dos fases:

- Una primera fase de bombeo escalonado para determinar el caudal de ensayo.
- Una segunda fase de bombeo a caudal constante hasta alcanzar el régimen permanente y, en cualquier caso, de al menos 24 horas de duración. Se controlará igualmente la recuperación del nivel durante al menos 24 horas. Los caudales se controlarán mediante tubo de Pitot.

Se dispondrá de un sistema de evacuación del agua bombeada lo suficientemente alejado del punto de ensayo para evitar el retorno de caudales a la zona afectada por el ensayo de bombeo.

Las medidas piezométricas en el pozo y piezómetros auxiliares se realizan con frecuencias de 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 75, 90, 105, 120, 150 y 180 minutos y, posteriormente, cada hora, siendo este plan también el plan de medidas seguidas en las recuperaciones.

Los niveles se controlarán mediante sondas eléctricas graduadas en centímetros.

Se empleará un procedimiento de interpretación adecuado a las características del ensayo, como por ejemplo, el **método de Theis y Jacob** para el régimen no permanente y el **método de descensos-distancias (o de Thiem)** para el régimen permanente.

Para cada uno de ellos se incluirán las curvas que permitan el cálculo de la permeabilidad, la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento.

6. ACONDICIONAMIENTO

Las labores de acondicionamiento abarcan las tareas de **entubación, engravillado y cementaciones** que se consideren necesarias para sostener las paredes del sondeo, filtrar las partículas finas, estabilizar las tuberías y desconectar otros materiales acuíferos independientes de la unidad acuífero a alcanzar.

7. ENTUBACIÓN

Durante las labores de perforación, se entubarán con tubería de emboquillado los primeros metros de perforación. Esta tubería será retirada una vez haya sido entubado el resto del sondeo. El espacio anular existente entre la columna de entubado definitiva y las paredes del sondeo, será cementado hasta la profundidad a la que se colocó la tubería de emboquille.

La columna de entubado definitiva presenta, habitualmente, un diámetro mínimo de 180 mm y un espesor de al menos 4 mm. La apertura y distribución de los filtros se fija en función de la granulometría y disposición de los materiales atravesados.

7.1. ENTUBADOS PROVISIONALES

La utilización de revestimientos provisionales en las paredes del pozo depende de la naturaleza de los terrenos atravesados y de las condiciones de funcionamiento del pozo.

La entubación provisional durante la construcción del pozo puede ser necesaria para sostener los horizontes ya perforados si en ellos se producen desprendimientos o deformaciones que provocarían enganches o incluso bloqueos de la sarta de perforación.

Los entubados provisionales, que en algunos casos pueden constituirse en definitivos, pueden ser necesarios, por ejemplo, cuando se construyen pozos a percusión en terrenos incoherentes. Por el contrario, los métodos a rotación buscan evitar entubados provisionales usando lodos de perforación adecuados.

Finalmente, conviene señalar que las tuberías provisionales suelen ser, por lo general, de acero al carbono.

7.2. ENTUBACIÓN DE EMBOQUILLE

En los pozos de agua se realiza un entubado de emboquille con un diámetro superior al resto de la perforación utilizando tubería ciega que posteriormente se cementa.

La primera función que cumple el emboquille en un pozo es estabilizar la zona superior del terreno, que suele estar suelta y es muy inestable, para permitir la perforación posterior del pozo. Además esta tubería cementada permitirá servir como sello aislante frente a contaminaciones superficiales durante el posterior funcionamiento del pozo.



Otra función que cumple la tubería de emboquille es servir de soporte, mediante los elementos de sujeción adecuados de la tubería definitiva que, en muchas ocasiones y para evitar efectos de pandeo, se coloca suspendida sin apoyar en el fondo del pozo.

Finalmente y por razones preventivas en materia de higiene, suele ser necesario realizar entubaciones de emboquille con tubería ciega cementada para evitar contaminaciones en el pozo por entrada de aguas más superficiales y en general de peor calidad.

La longitud de la tubería de emboquille suele variar entre 10-30 metros, en función de las condiciones específicas de cada pozo. Habitualmente el espacio anular entre la perforación y la tubería de emboquille se rellena con lechada de cemento con

una densidad de 1,7 gr/cc, lo que corresponde a una dosificación de unos 30 litros de agua por cada 50 kilogramos de cemento. Posteriormente la tubería definitiva también se cementa en el mismo tramo que la tubería de emboquille. En caso de presentarse tramos que pudieran tener efectos negativos sobre el agua captada se procede a su cementación en la tubería definitiva. Si existe presencia de yesos o anhidritas en las zonas a cementar será preciso el empleo de cementos resistentes del tipo "SR" (sulforesistentes).



7.3. ENTUBADOS DEFINITIVOS

El entubado definitivo de un pozo desempeña dos misiones fundamentales:

- Sustener las paredes de la perforación.
- Constituir la conducción hidráulica que pone el acuífero a explotar en comunicación con la superficie del terreno o con los elementos de extracción correspondientes.

Existen terrenos con gran estabilidad en los cuales no es necesario realizar entubaciones durante la perforación y en los que tampoco sería preciso efectuar entubación definitiva si no se instalaran equipos de bombeo. Sin embargo y a diferencia de otras perforaciones, en el caso de los pozos se instalará una bomba y otros elementos electromecánicos para la extracción de agua, lo que dará lugar a circulación hidráulica en el subsuelo que producirá una mayor inestabilidad de los terrenos. Si los pozos de agua no se entubarán, al menos en la zona comprendida desde la superficie hasta donde se instale la cámara de bombeo, la circulación de agua podría producir desprendimientos y derrumbes que afectarían al equipamiento

electromecánico, poniendo en peligro la inversión realizada en la obra.

Cuando una misma perforación atraviesa varios niveles acuíferos, el sellado de aquellos que no se desee aprovechar puede conseguirse mediante entubado (generalmente, más cementación).

En los pozos que solo atraviesan formaciones coherentes y cuando no se necesita sellar ningún horizonte, cabe la posibilidad de no revestir sus paredes. En cualquier caso, es recomendable, considerar la eventualidad de algún posible desprendimiento (aunque sólo fuera de pequeños fragmentos o lascas) que pudiera perjudicar la bomba o grupo de bombeo. En pozos para abastecimiento a poblaciones es preciso cumplir además con las exigencias de protección sanitaria.

Las tuberías de revestimiento pueden ser de varios materiales; metálica (hierro al carbono, acero inoxidable), PVC, polietileno alta densidad (PEAD), etc. Las utilizadas para sondeos de abastecimiento son metálicas (de acero) y pueden instalarse con manguitos de unión o con uniones soldadas, lo que se hace a medida que se van introduciendo los tramos previamente numerados en el sondeo. En general, se debe evitar el empleo de tuberías de distintos metales, sean roscadas o soldadas, pues en tales casos se favorecen los fenómenos de corrosión.

Las tuberías utilizadas para sondeos piezométricos pueden ser metálicas o de material plástico, instalándose los tramos de tubería también roscados o con manguitos de unión.

La entubación de un pozo puede ser toda ella de un único diámetro, aunque también puede disponerse con diámetros distintos, escalonados en orden decreciente con el aumento de profundidad. El acuerdo entre tramos contiguos de diferente diámetro puede hacerse en superficie (antes de introducir la tubería en el pozo) mediante un tramo de unión troncocónico, o bien puede realizarse en el interior del pozo una vez que cada tramo de tubería se ha situado a la profundidad debida, para lo cual se suele disponer de piezas de unión especiales.

En el entubado de un pozo o sondeo se deben considerar dos aspectos del mismo: el diámetro de la tubería y el espesor de su pared. Con respecto al espesor de la pared es muy importante tener en cuenta los esfuerzos que debe resistir la entubación: su propio peso durante la instalación y los empujes laterales del terreno e hidrostático, durante su instalación y servicio.

En cuanto al diámetro del entubado se debe elegir, por razones económicas, el mínimo que sea compatible con un correcto proceso constructivo y con un adecuado funcionamiento del pozo.

Para la correcta ejecución de un entubado deben preverse su correspondiente cementación para obtener la unión de la tubería de revestimiento con la pared del pozo. Con ello se consigue:

- Evitar que las aguas superficiales puedan contaminar las profundas.
- Evitar conexiones entre acuíferos a través del hueco del pozo.
- Aumentar la resistencia del entubado, tanto mecánica como frente a la corrosión e incluso en vistas a realizar desarrollos de la formación acuífera.

7.4. DIÁMETRO DE ENTUBADO DE LOS SONDEOS

El diámetro de la tubería de revestimiento a colocar será el parámetro que condicionará el diámetro aconsejable en la perforación del pozo.

El diámetro de todo pozo o sondeo vertical se puede descomponer en dos tramos bien definidos:

- Tramo donde se produce la entrada de agua desde la capa acuífera.
- Tramo que enlaza el anterior con la superficie del terreno. Este tramo, salvo en el caso de las aguas surgentes, debe albergar la bomba de extracción, por lo que se puede dividir en otros dos tramos:
 - Desde el exterior hasta donde se localice la bomba.
 - Desde la bomba hasta el tramo de entrada del agua al pozo.

No siempre la morfología del pozo expresa claramente estos tramos tal y como ocurre por ejemplo, cuando la bomba debe situarse dentro del tramo de entrada del agua al pozo.

No existe ninguna razón para que los diámetros de los tramos mencionados sean iguales, ya que cada uno de ellos deberá satisfacer unas exigencias distintas:

- A. En el tramo de entrada de agua en el pozo, el diámetro deberá producir un área libre para dar paso al agua de manera que las pérdidas de carga por dicho paso del agua sean las mínimas compatibles con los restantes condicionamientos del pozo.
- B. Desde la superficie del terreno hasta donde está colocada la bomba, el diámetro del pozo deberá permitir el paso de esta última con las holguras recomendables y, por tanto, vendrá condicionado por las características de

fabricación de la misma.

- C. El tramo de enlace entre las dos anteriores, en su caso, sólo tendría la imposición de tener que permitir el paso del caudal a extraer sin pérdidas de cargas excesivas en relación con las restantes características del pozo.

Si el planteamiento teórico anterior se pasa a la línea de ejecución práctica, resulta que son los tramos A y B los que imponen el diámetro del pozo.

En ocasiones el pozo resultará de diámetro único a causa, por ejemplo, de que el diámetro mayor sea el exigido por el tramo de entrada del agua al pozo o porque la bomba haya de llegar a situarse en éste mismo tramo.

En otros casos, podrán disponerse dos o más diámetros en forma telescópica. Por ejemplo, cuando para el tramo de entrada del agua al pozo sea suficiente un diámetro menor que el preciso para el paso de la bomba y ésta pueda quedar situada por encima de aquel tramo.

El tramo de paso de la bomba se fija en unos 75 a 100 mm, la diferencia mínima entre el diámetro interior de entubado y el diámetro exterior de la bomba o grupo de motobomba (incluido el cable eléctrico). El caudal de extracción previsto en el pozo condiciona el diámetro de la bomba y éste, a su vez, el de la tubería de revestimiento.

7.5. SELECCIÓN DE LA TUBERÍA A EMPLEAR

El programa de las operaciones de entubación viene establecido inicialmente por las características recogidas en el proyecto constructivo. Generalmente, el tipo de tubería que se utiliza es el de acero al carbono. Para pozos de aguas minerales o cuyas aguas captadas sean destinadas a procesos de la industria alimentaria, se utiliza la tubería de acero inoxidable, puesto que además de la potabilidad del agua se puede garantizar también la constancia de las características físico-químicas del agua captada. La tubería de PVC-U se emplea para entubación en ambientes agresivos como pueden ser los salinos cuando se captan aguas salobres.

El diámetro interior de la tubería debe ser de unos 100 mm superior al de la bomba a instalar en el pozo y para el cálculo del espesor de la tubería, debe tenerse en cuenta el concepto de presión de rotura (P_r) en una tubería de material homogéneo, definido como aquella presión hidráulica interior que produce una tracción circunferencial en el tubo igual a la tensión nominal de rotura a tracción (σ_r), del material de que esta fabricado. Viene definida por la siguiente expresión:

$$Pr = \frac{2e}{D} \sigma_r$$

donde:

Pr = Presión de rotura, en Kp/cm².

e = Espesor de la tubería, en mm.

D = Diámetro de la tubería, en mm.

σ_r = Tensión nominal de rotura a tracción, en Kp/cm².

Esta expresión, que es directamente aplicable al caso de la tubería de impulsión que se instale, podría extrapolarse a la tubería de revestimiento teniendo en cuenta de que se trataría de presiones en lugar de tracciones. Estas presiones son debidas a la acción del peso de los terrenos y la diferencia de contrapresión del agua durante el bombeo. Este efecto es creciente, en general, conforme aumenta la profundidad del pozo. Consecuentemente, de acuerdo con la expresión anterior, para un determinado tipo de material (σ_r), será preciso incrementar el espesor de la tubería conforme aumente la profundidad del pozo y el diámetro de la entubación. En tabla siguiente se recogen, a título orientativo, los espesores mínimos recomendables para chapa de acero, para profundidades menores de 200 m.

ESPEORES MÍNIMOS RECOMENDABLES PARA ENTUBACIONES DE POZOS CON CHAPA DE ACERO AL CARBONO (Profundidades menores de 200 m).	
Diámetro interior (mm)	Espesor de pared (mm)
Hasta 350	5
De 350-500	6
Más de 500	7 - 8

Fuente: García Ruiz, T. (2009).

Para profundidades superiores a las indicadas en esta tabla, se toma el espesor de chapa inmediatamente superior.



(Imagen cortesía de Sondeos Puebla, S.L)

7.6. REJILLA

La zona de admisión de agua al pozo constituye la parte esencial del mismo. En ocasiones esta zona no se entuba, aunque lo más frecuente es que sí se disponga un revestimiento en ella.

A partir de los datos obtenidos en el control geológico de los “detritus” en la perforación, y de los registros geofísicos del pozo se pueden establecer los niveles acuíferos donde deberán situarse los tramos filtrantes en la columna de entubación. Los tipos de tubería filtrante que se utilizan habitualmente son las de filtro de puentecillo para acuíferos detríticos y las de tubo ranurado para acuíferos consistentes con porosidad secundaria, como pueden ser los acuíferos calcáreos y aquellos que corresponden a pozos realizados en terrenos metamórficos e ígneos. Otro tipo de filtros, que son menos utilizados son los de tipo Johnson y los de persiana.



(Imagen cortesía de Sondeos Puebla, S.L)

Para definir adecuadamente la rejilla en el proyecto de un pozo, se debe considerar:

- La longitud.
- El tamaño de la ranura.
- El diámetro.
- La resistencia mecánica.
- El comportamiento de la rejilla frente a aguas corrosivas o incrustantes.

La longitud óptima de una rejilla:

- Es función de la geometría y parámetros hidrológicos del nivel del acuífero a explotar.
- Depende del espesor y estratificación de este último y del posible descenso dinámico del agua en el mismo.
- Inicialmente, la rejilla debe tener la mayor longitud posible, pero sin que llegue a ser un obstáculo para el descenso del nivel dinámico del agua en el pozo.

Posición de la rejilla:

- En acuíferos libres, homogéneos y de espesor importante, la rejilla se situará en la parte inferior de la zona saturada y cubriendo 1/2 a 1/3 de la misma.
- En acuíferos cautivos, en cambio, es aconsejable colocar la rejilla sobre el 70% u 80% del espesor de la capa, con rejilla única centrada o con varios tramos repartidos de modo uniforme sobre la misma.

Tamaño y forma de las ranuras:

- En formaciones coherentes donde exista la posibilidad de que se produzca pérdida de carga en la entrada del agua será necesario definir el tamaño y forma de las ranuras y a su vez, el diámetro de la rejilla (función del área abierta que aquellas condicionen, de la longitud de la rejilla ya establecida



y del caudal de bombeo que se espere o se desee).

- En acuíferos de materiales incoherentes habrá que atender además a la circunstancia de que el agua que se extraiga no arrastre arenas.
- Para diseñar adecuadamente una rejilla deben realizarse análisis granulométricos sobre muestras representativas del material acuífero, tomadas al perforar el pozo o en un sondeo de reconocimiento previo al mismo. El tamaño de abertura se elige según los resultados de tales análisis y según se disponga o no de un macizo de grava.
- Establecida la longitud de la rejilla y su tamaño de abertura, el diámetro de la misma se establece en función del caudal que haya de extraerse del pozo, teniendo en cuenta consideraciones relativas a la velocidad de paso del agua a través de la rejilla. Dicha velocidad debe ser tal que no provoque pérdidas de carga excesivas ni dé lugar a fenómenos de corrosión o de incrustación.

El diseño de las aberturas de los filtros de puentecillo está relacionado con la granulometría de la grava a emplear de tal manera que se pueda combinar, de forma óptima impidiendo la entrada de arenas al pozo y al mismo tiempo la menor pérdida de carga posible. Para ello se utiliza la siguiente expresión que relaciona la granulometría de la grava del empaque y la abertura del filtro de puentecillo:

$$2 d_f \leq d_g \leq 4 d_f$$

Donde:

d_f = Abertura de los filtros de la tubería.

d_g = Diámetro de la grava del empaque.

Consecuentemente, la granulometría de la grava a emplear en el empaque debe estar comprendida entre 2 y 4 veces la abertura del filtro a utilizar en el tramo filtrante. Por ejemplo si la grava a utilizar en el empaque está comprendida entre 3 y 6 mm la dimensión óptima del filtro de puentecillo será de 1,5 mm.

Pruebas de laboratorio y experiencias en campo han demostrado que la velocidad óptima se sitúa alrededor de los 3 cm/s, considerada la totalidad del área abierta de la rejilla. Walton (1970) liga los valores óptimos de tal velocidad con los de la permeabilidad (ver tabla). Las velocidades óptimas que recomienda están en relación con la fórmula que él propone para relacionar longitud óptima de rejilla, caudal, área efectiva de huecos y velocidad óptima de entrada del agua:

$$A_e = 100 \frac{Q}{\lambda \cdot v}$$

donde:

- A_e es el área abierta efectiva de la rejilla (en cm² por metro de longitud de rejilla)
- Q es el caudal del pozo (l/s),
- λ es la longitud óptima de la rejilla (en m)
- v es la velocidad óptima de entrada del agua en la rejilla (cm/seg).

El área abierta efectiva (A_e) es aquella parte del área abierta total, A , que no queda taponada por el material que la envuelve.

El valor de A_e depende sobre todo de la forma y del tipo de ranuras de la rejilla y de la forma, tamaño y granulometría del material acuífero o macizo de grava.

Por término medio, puede estimarse que en circunstancias normales la mitad del área abierta de una rejilla queda bloqueada; luego, en general puede estimarse que $A_e = 0,5 \cdot A$.

Permeabilidad del terreno (m/día)	Velocidad óptima de entrada de agua en el pozo (cm/seg)
> 240	6,0
240	5,5
200	5,0
160	4,5
120	4,0
100	3,5
80	3,0
60	2,5
40	2,0
20	1,5
< 20	1,0

7.7. COLOCACIÓN DE LA TUBERÍA EN EL POZO

La introducción de la tubería en el pozo debe hacerse con el cabrestante de la máquina o con una grúa auxiliar, suspendiendo la tubería mediante abrazadera o collar, evitando la perforación de la chapa de la tubería, lo que debilitaría la misma. A tal fin se dispone en la tubería de unos anillos soldados. La tubería de revestimiento del pozo debe estar en perfecto estado y no presentar ningún tipo de defectos tales como rebabas, abolladuras, ni señales de corrosión.

Una vez definida la columna de entubación se procede a la numeración de cada tramo, comenzando desde el fondo del pozo con pintura en el interior y exterior de cada tubo, para realizar el control de la entubación. Con el fin de evitar el debilitamiento mecánico de la columna no se debe de colocar más de tres tramos seguidos de tubería filtrante. Los tramos de tubería ciega serán soldados helicoidalmente, lo que presenta unas mayores características de resistencia.

En muchas ocasiones la tubería de revestimiento queda suspendida desde la superficie para evitar efectos de pando en la columna, hormigonándose el anular entre esta tubería y la de emboquille.

8. ENGRAVILLADO

En algunos casos no es suficiente la colocación de una rejilla para el correcto funcionamiento del pozo, sino que se hace necesario colocar un "relleno de grava" de características determinadas, en el espacio anular que queda entre la pared del terreno perforado y la rejilla. Estos rellenos de grava (a veces denominados "empaques") son recomendables en los siguientes casos:

- Acuíferos de arenas finas y uniformes.
- Formaciones muy estratificadas con capas alternadas de materiales gruesos, medios y finos.
- Aguas muy incrustantes.

La dimensión de la grava a utilizar viene determinada por la granulometría del acuífero interceptado. En los acuíferos con porosidad secundaria no es imprescindible el engravillado, aunque también se realiza en algunas ocasiones.

Las funciones fundamentales del macizo de grava son:

- Estabilizar el terreno.
- Evitar el bombeo de arenas.
- Aumentar la permeabilidad en el entorno de las rejillas.

La grava que se utiliza para el empaque debe ser de naturaleza silíceo con clastos sub-redondeados, con la granulometría que se determine y coeficiente de uniformidad ($C_u = d_{60}/d_{10}$) inferior a 2,5.

Las operaciones de engravillado tienen que ser controladas de forma continua y una vez comenzadas no deben interrumpirse hasta su finalización. El control realizado debe asegurar que en ningún momento queden en el espacio anular pared-tubería huecos sin rellenar de grava lo que puede dar lugar posteriormente a asientos bruscos de grava con peligro de colapso de la tubería. Hay que evitar que se produzcan asentamientos bruscos o "golpes de grava", tanto durante las propias operaciones de engravillado como en el ensayo de bombeo posterior.

Para definir las características de la grava a utilizar en el empaque de gravas es necesario hacer un análisis granulométrico a partir de distintas muestras del acuífero atravesado obtenidas durante la perforación del pozo. Cada una de estas muestras se recoge en una bolsa de plástico y se envía a un laboratorio homologado. Una vez obtenido el análisis granulométrico existen varios procedimientos para la elección de la grava. Todos ellos tienen su base en pruebas experimentales llevadas a cabo por diferentes firmas comerciales de filtros y otros organismos, no existiendo diferencias sustanciales entre los resultados que se obtienen utilizando la mayor parte de los métodos. Un criterio ampliamente utilizado que resulta de sencilla aplicación, y con el que se obtienen buenos resultados, consiste en que una vez efectuado el análisis granulométrico de los terrenos muestreados y dibujada la curva granulométrica se separa el 10 % del material más fino (d_{10}) y el 30 % más grueso (d_{70}). Se determina de esta forma el diámetro medio del 60 % restante, resultando que la composición del macizo de grava vendría determinado por los siguientes límites:

- Límite superior: seis veces el diámetro medio del 60 % anteriormente definido.
- Límite inferior: tres veces el diámetro medio del citado 60 %.

Con este criterio se consigue eliminar en el posterior desarrollo un porcentaje elevado de finos, aumentando la permeabilidad, y se retienen suficientemente los elementos de mayor granulometría. Posteriormente los tamaños calculados se ajustarán a los disponibles comercialmente.

9. LIMPIEZA Y DESARROLLO

Una vez concluida la perforación del sondeo, es preciso proceder a:

- La extracción de los restos de lodos y detritus de perforación.
- Corregir los daños y obstrucciones que se pudieran haber ocasionado en la formación acuífera durante las operaciones de perforación y estabilizar la formación acuífera en lo que respecta a las arenas.
- Eliminación de posibles fracciones finas tras la colocación de los empaques de grava del filtro.
- Tratar de obtener el mayor caudal específico posible.

A estas operaciones se las conoce con el nombre de **desarrollo del sondeo** y deben constituir parte integrante del proyecto y construcción de todo pozo porque su finalidad es obtener el mayor caudal específico posible, lo que se traduce en la práctica en obtener la mayor rentabilidad de la inversión realizada. Esto se consigue porque lo que se hace es acondicionar el propio acuífero en un entorno del pozo para obtener la mayor productividad en cuanto a los caudales de agua bombeados, disminuyendo las pérdidas de carga y aumentando por tanto los rendimientos específicos en l/s/m, y la vida útil de la obra.



En la práctica las operaciones de limpieza y desarrollo se realizan en muchas

ocasiones de manera conjunta porque las operaciones de desarrollo se fundamentan en la mejora de la permeabilidad en las proximidades de la captación y por lo tanto persiguen, además de la extracción de los lodos que hayan podido introducirse en la perforación, la eliminación adecuada de finos del acuífero en el caso de terrenos detríticos con porosidad primaria y en el aumento de los huecos y fisuras, en el caso de los acuíferos con porosidad secundaria.

Este aspecto es determinante especialmente a la hora de trabajar con un sistema de perforación a rotación con empleo de lodos.

En terrenos incoherentes, el desarrollo tiene por objeto eliminar las fracciones más finas del material acuífero en las inmediaciones de la rejilla de manera que se establezca la formación y se alcance una granulometría más gruesa y uniforme en dicha zona. De este modo se obtiene una mayor capacidad específica en el pozo y se favorece la vida útil del mismo.

En formaciones de rocas coherentes, el desarrollo busca limpiar las fisuras de la formación o incluso aumentarlas en número y tamaño.

Salvo los casos en que sea imprescindible disponer un macizo de gravas, siempre debe recomendarse la construcción de pozos con desarrollo natural. En general éstos superan, en seguridad de funcionamiento y en duración a los construidos con relleno artificial de grava, presentando además, claras ventajas económicas al exigir menos diámetro de perforación y menos operaciones.

De todos modos, se deberán prever asimismo las oportunas operaciones de desarrollo para eliminar lodos de perforación, costras o cualquier otro elemento que pueda disminuir la eficiencia del pozo.

Pueden utilizarse diferentes métodos de desarrollo dependiendo de la naturaleza de las formaciones acuíferas:

- Los métodos correspondientes a terrenos de gravas y arenas consisten en diferentes sistemas de provocar la entrada y salida del agua a través de la rejilla y, consiguientemente, una cierta agitación del material de la formación. Por ello es muy importante la elección de una rejilla adecuada y del tamaño de abertura de la misma. La morfología de la rejilla no debe ocasionar pérdidas importantes en la energía de desarrollo ni producir zonas apantalladas sobre la formación a tratar. Por otra parte, una relación adecuada entre tamaños de grano en el terreno natural y abertura de rejilla será fundamental, ya que si esta es demasiado pequeña, el desarrollo quedará limitado y si fuera demasiado grande, podría ocasionar entradas continuas de arena al pozo.

- Para desarrollo de pozos en rocas coherentes se pueden utilizar los mismos métodos que en caso de terrenos incoherentes. En particular, el método de pistoneo, combinado con el uso de polifosfatos, en general da buenos resultados. Otros métodos efectivos son el sobrebombeo, el bombeo intermitente, las descargas de aire comprimido y el tratamiento con nieve carbónica.
- Otros métodos de desarrollo, específicos para rocas consolidadas, son los de fracturación hidráulica, explosivos y acidificación. El primero exige unas instrumentaciones poco compatibles con los costes normales de pozos para agua.

El tiempo estimado de duración de las mencionadas operaciones será de 16 horas para los sondeos perforados a rotación con circulación inversa y de 8 horas para el resto de métodos de perforación.

De una forma sintética, los métodos de desarrollo que se han venido mencionando, se pueden clasificar en:

- **Mecánicos:**
 - Sobrebombeo.
 - Bombeo con aire comprimido.
 - Pistoneo.
 - Sistema de pozo cerrado.
 - Chorro de agua a alta presión.
- **Químicos:**
 - Acidificación.
- **Otros:**
 - Explosivos.
 - Nieve carbónica.

Los métodos mecánicos de desarrollo se aplican fundamentalmente en terrenos detríticos en los que se ha colocado un empaque de grava. Para que estos desarrollos sean efectivos se debe cumplir que existan las relaciones que se han descrito anteriormente entre la granulometría del acuífero, la granulometría del empaque de grava y el tamaño de abertura del filtro de puentecillo. Lo que se persigue en todos los casos es extraer los restos de lodo que hayan podido penetrar en la formación durante la perforación, pero sobre todo actuar sobre el propio acuífero en un entorno del pozo extrayendo los materiales más finos de la formación. En todos los casos lo que se realiza es un movimiento de agua para el arrastre de finos con velocidades de circulación, y por tanto caudales, superiores a

los que se utilizarán durante la explotación del pozo.

Con el fin de que durante las operaciones de desarrollo no se produzcan puentes de grava, que como en el caso de las operaciones de engravillado, pudieran producir asientos posteriores de la grava con peligro de colapso de la tubería, es preciso alternar el movimiento de circulación del agua periódicamente. En cualquier caso en los periodos de extracción los movimientos deben ser de mayor velocidad para que la componente resultante de circulación del agua para la extracción de finos sea hacia el pozo. A continuación se describen los procedimientos de desarrollo mecánico que se utilizan con mayor frecuencia. En algunas ocasiones estas operaciones de desarrollo se realizan sobre tramos seleccionados del acuífero que se aíslan entre sí mediante el empleo de obturadores o “packers”.

- **Sobrebombeo:** Este procedimiento, con el empleo de bomba, consiste en alternar las operaciones de bombeo de agua y parada, con el fin de provocar los efectos descritos en el apartado anterior. Esta operación suele realizarse en las primeras etapas de la fase del ensayo de bombeo de un pozo. El inconveniente más grande es que se produce un gran desgaste de los equipos de bombeo por arrastre de partículas.
- **Bombeo con aire comprimido:** El fundamento de este sistema es similar al del sobrebombeo pero utilizando aire comprimido para la extracción del agua subterránea. El dispositivo que se emplea para el bombeo de agua subterránea con aire comprimido donde existen dos conductos en cabeza, uno para la inyección del aire comprimido y otro para la extracción del agua bombeada.
- **Pistoneo:** Para la realización del desarrollo mediante pistoneo se utiliza una máquina de percusión de manera que se sustituye el trépano por un cilindro formado por una serie de discos. El movimiento transmitido por el cable al pistón da lugar a un movimiento alternativo del émbolo que a su vez se traduce en un flujo de agua de sentido alternante pozo-acuífero, que permite la extracción del material más fino del acuífero. Obviamente los finos extraídos quedan en el pozo por lo que es necesario proceder a la limpieza, una vez finalizadas las operaciones de pistoneo.
- **Sistema de pozo cerrado:** Este desarrollo se efectúa con aire comprimido y su funcionamiento conceptual es similar al del pistoneo, con la ventaja de que el aire permite realizar también la limpieza final del pozo. En este método es el propio aire inyectado con un compresor de alta presión el que realiza la función del émbolo del caso anterior.

10. CONTROL CONSTRUCTIVO CON REGISTRO ÓPTICO

El registro óptico con vídeo es una herramienta fundamental para verificar la calidad constructiva de la obra y los efectos de las operaciones de limpieza sobre los distintos tramos filtrantes. Su aplicación es cada vez más habitual, superando así la simple inspección exterior del sondeo que no aporta ningún dato relativo a la calidad de la obra excepto al cierre y acabado.



11. PROTECCIÓN SANITARIA Y DESINFECCIÓN

En su estado natural, el agua subterránea generalmente es de buena calidad biológica, especialmente en aguas extraídas de formaciones arenosas.

Una adecuada protección sanitaria de un pozo incluye todas las fases de su proyecto y construcción. Por ello es preciso seleccionar de forma adecuada su lugar de emplazamiento, poniendo especial atención a la posible existencia de fosas sépticas, corrales, alcantarillados, desagües, etc., focos generales de contaminación.

Durante las labores de construcción, las propias manipulaciones inherentes a la misma pueden provocar contaminaciones y, durante el funcionamiento del pozo, también será necesario adoptar medidas de protección.

Una vez terminada la construcción del pozo y completada la instalación de sus accesorios, es esencial proceder a su total desinfección, para lo que se suele utilizar una solución concentrada de cloro, disolviendo en el agua hipoclorito cálcico o sódico o cloro gaseoso.



12. CIERRE, TERMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DEL ESPACIO AFECTADO

Esta etapa incluye la retirada de todos los equipos y materiales utilizados durante la obra, el cierre en cabeza de sondeo con brida atornillada o cabezal con válvula y manómetro y, finalmente, la construcción de una solera de hormigón con pendiente hacia el exterior. Es frecuente también la construcción de una caseta de protección.

12.1. PROTECCIÓN CONTRA RETORNOS

Se debe disponer la instalación de sistemas antirretorno para evitar la inversión del sentido del flujo en, al menos, los siguientes puntos:

- Después de los contadores;
- En la base de las ascendentes;
- Antes del equipo de tratamiento de agua;
- En los tubos de alimentación no destinados a usos domésticos;
- Antes de los aparatos de refrigeración o climatización.

Las instalaciones de suministro de agua no pueden ni deben conectarse directamente a instalaciones de evacuación ni a instalaciones de suministro de agua proveniente de otro origen que la red pública.

En los aparatos y equipos de la instalación, la llegada de agua se realizará de tal modo que no se produzcan retornos y los antirretornos se dispondrán combinados con grifos de vaciado de tal forma que siempre sea posible vaciar cualquier tramo de la red.

12.2. RESTAURACIÓN DE TERRENOS

Se incluyen aquí el acondicionamiento de la balsa de lodos mediante la extracción de detritus y su transporte a vertedero autorizado de inertes y relleno con el propio material de la excavación.

Posteriormente, se producirá la restauración de los accesos y emplazamientos construidos.

6. CONTROL DE CALIDAD DE LAS TOMAS DE MUESTRAS DE AGUA EN SONDEOS

1. REALIZACIÓN DEL MUESTREO

El control analítico de la calidad de las aguas se basa en una adecuada toma de muestras, en garantizar que estas muestras sean objetivamente representativas del medio natural y en su correcta gestión hasta su análisis, al objeto de disponer de datos de calidad. Es por ello que las técnicas de muestreo utilizadas son de una importancia crítica para conseguir resultados óptimos. El resultado del análisis de una muestra no puede ser de mejor calidad que la muestra sobre la que se realiza dicho análisis. Así pues, si el muestreo no se realiza de forma adecuada, los resultados que se obtengan no informarán debidamente de las características que se pretende estudiar.

Para llevar a cabo un control de calidad de los resultados analíticos es muy frecuente la toma de un número de muestras duplicadas equivalente al 5% del total que se enviará al laboratorio de análisis con un código diferente y que deben servir de muestras de control.

Los puntos de muestreo para análisis isotópico se seleccionarán de acuerdo con la Dirección de los trabajos y se realizará de forma que, al menos, se seleccionen varios puntos dentro de cada masa de agua subterránea definida. El muestreo de agua de lluvia sirve como punto de referencia y para la interpretación de los resultados.

En muchos casos, se debe disponer de equipos móviles dotados de los medios técnicos y tecnológicos adecuados para la realización del análisis "in situ" de los constituyentes inestables, la toma de muestras y en su caso, la aplicación de los métodos de preservación que sean necesarios para retardar los cambios químicos y biológicos que inevitablemente se producen en las muestras de agua después de su recogida.

Con respecto a las condiciones para la toma de muestras, hay que tener en cuenta

que:

- La composición del agua almacenada en un pozo y en sus proximidades no suele representar a la composición media del agua de la zona de estudio. En general se aconseja que un pozo sea bombeado hasta que se renueve el agua almacenada en su entorno. Esta condición de bombeo previo, en ocasiones puede condicionar la selección de los pozos que constituyen las redes de muestreo.
- El tiempo de bombeo requerido antes del muestreo depende de muchos factores que incluyen las características del pozo, la naturaleza hidrogeológica del acuífero, el tipo de equipo de muestreo utilizado y los parámetros que van a ser analizados.
- Como no hay un volumen específico de agua bombeada que asegure la representatividad de la muestra extraída, en muchos casos, será aconsejable apoyarse en otros parámetros que indiquen el momento en que se empiezan a obtener muestras representativas. Entre los parámetros utilizados con este fin se encuentran temperatura, pH y conductividad, de forma que una estabilización de los mismos indica que se ha renovado el agua almacenada tanto en el pozo como en sus inmediaciones.

Previamente a la recogida y análisis de muestras de agua, se deben elaborar las hipótesis de trabajo a partir de los datos disponibles, identificando el número y tipo de análisis que es necesario realizar, tanto en campo, como en laboratorio en cada uno de los puntos de control. De este modo quedan determinados los métodos de toma de muestras y análisis, tratamiento y preservación, y a su vez el equipo, material y recipientes de almacenamiento requeridos para el muestreo de cada uno de los puntos.

Con respecto a las condiciones de muestreo, aplicación de técnicas de preservación y realización de análisis "in situ" de constituyentes inestables, se seguirán los procedimientos específicos que recomienden los laboratorios de análisis, en función de los parámetros de análisis. Por su parte, los análisis de isótopos se llevarán a cabo siempre en laboratorios especializados que dispongan de la correspondiente acreditación.

En las muestras para análisis isotópicos se determinarán O^{18} y H^2 y, en su caso, H^3 , ya que el estudio de estos isótopos estables (especialmente en el caso de O^{18} y H^2) de las aguas subterráneas y de lluvia, permite definir las zonas de recarga del acuífero y las cotas a las que se produce dicha recarga. Para ello es preciso

disponer de muestras de lluvia tomadas en varias altitudes.

El diseño de los programas de muestreo tendrán en cuenta, al menos, las referencias establecidas en las siguientes normas UNE u otras que las sustituyan:

- UNE-EN 25667-1:1995 Calidad del agua. Muestreo. Parte 1: Guía para el diseño de los programas de muestreo. (ISO 5667-1:1980).
- UNE-EN 25667-2:1995 Calidad del agua. Muestreo. Parte 2: Guía para las técnicas de muestreo. (ISO 5667-2: 1991).
- ISO 5667-11:1993 Calidad del agua. Muestreo. Parte 11: Guía para el muestreo de aguas subterráneas.
- ISO 5667-18 Calidad del agua. Muestreo. Parte 18: Guía para el muestreo de aguas subterráneas en zonas contaminadas.
- ENV-ISO 13530:1997. Calidad del agua. Guía del control de calidad analítica para el análisis del agua.

Consecuentemente, la toma de muestras se realizará siguiendo un procedimiento normalizado de trabajo en el cual debe especificarse:

- La metodología seguida en cada muestra,
- El material utilizado: tipo de botellas (material, cierre y capacidad) tomamuestras, accesorios, protocolos de limpieza de los materiales no desechables.
- El Sistema de identificación o etiquetado de las botellas.

Se detallan a continuación las principales peculiaridades relativas a la toma de muestras según la tipología del control:

Captaciones, manantiales y surgencias.

Antes de efectuar el muestreo en captaciones es necesario realizar un purgado de las mismas para reemplazar el agua estancada por agua procedente de la formación que se quiere estudiar.

En las captaciones instaladas, con objeto de obtener una muestra representativa del agua en el entorno de la captación, se seguirá la norma general de dejar la bomba en funcionamiento el tiempo suficiente para

renovar 3-4 veces el agua de la entubación, con objeto de que la muestra sea representativa. En el caso de existencia de línea de cloración, el agua se tomará antes de ésta, en el grifo más cercano a la boca del sondeo y, si esto no fuese posible, se cortará la cloración y se hará la toma después de que haya transcurrido el tiempo suficiente para que se elimine el agua clorada en la red.

En captaciones sin instalación, la toma se realizará mediante una bomba portátil.

El caudal de muestreo debe mantenerse entre 100 y 300 ml por minuto mientras se llena el primer recipiente, que en el 20% de las muestras será un galón de vidrio color topacio, destinado al análisis de microcontaminantes orgánicos, para evitar la pérdida de los compuestos con mayor volatilidad. Este caudal se puede incrementar posteriormente para el llenado del resto de los recipientes, los cuales se describen posteriormente. A este respecto, y por el motivo citado anteriormente, se debe considerar también que de forma general en las operaciones de muestreo, incluida la transferencia del agua a los recipientes, se debe procurar minimizar la aireación de las muestras.

Captaciones no instaladas.

En el caso de que se utilicen botellas lastradas, para el muestreo en sondeos no equipados con bomba de captación, éstas deberán tener boca ancha para evitar la aireación de la muestra.

En el caso de utilizar bombas portátiles estas deben ser revisadas antes de cada campaña para comprobar su correcto funcionamiento.

En algunos puntos, en función de la existencia de fuentes potenciales de contaminación, se recogerán muestras adicionales para determinación de otros contaminantes.

Consideraciones generales para la toma de muestras.

Además de las consideraciones anteriores, hay que tener en cuenta que el equipo de muestreo debe ser de un material inerte y que ciertos materiales, como PVC, silicona, polietileno etc., no son adecuados para el muestreo cuando se van a analizar microcontaminantes orgánicos. En estos casos, y con el fin de evitar alteraciones en las muestras, éstas se tomarán con tomamuestras desechables de teflón, debiendo certificar la empresa adjudicataria su eliminación.

El cable de bajada en el caso de los tomamuestras debe ser de acero inoxidable o estar cubierto de algún material apropiado, como resinas fluorocarbonadas.

Asimismo, y como principio general, se debe exigir que el tornamuestras que se utilice para el muestreo debe estar exento de contaminación y se tiene que enjuagar varias (2-3) veces con el agua objeto de estudio antes de tomar la muestra definitiva; práctica que debe seguirse igualmente con los recipientes en los que se van a guardar las muestras para su posterior transporte y envío al laboratorio de análisis.

Respecto al llenado de los recipientes, enjuagados con el agua a analizar como se acaba de señalar, debe tomarse la precaución de no dejar burbujas en el interior, así como de llenarlos completamente y taparlos de modo que no quede aire encima de la muestra. De este modo se limitan las interacciones del agua con la fase gaseosa y las modificaciones que podrían surgir en el contenido de algunos elementos.

La última consideración en relación con la toma de muestras es que los equipos de campo utilizados para hacer medidas in situ de pH, conductividad, temperatura etc., concretamente la parte que está en contacto con el agua, debe ser lavada con agua destilada entre muestras consecutivas.

Elaboración del boletín de trabajo en campo.

Las características e incidencias de las campañas de muestreo serán recogidas en fichas en las que figuren los datos y circunstancias necesarios para su identificación inequívoca. Dichas fichas se cumplimentarán al realizar la medición del nivel o en la toma de muestra y contendrán los siguientes datos:

- Número de identificación del punto de control.
- Coordenadas UTM del punto de toma y fotografía digital de este.
- Nombre de quien ha hecho la toma de muestra
- Fecha y hora de la toma
- Identificación completa del punto de muestreo
- Método de medida de nivel y de toma
- Tiempo de bombeo
- Profundidad de muestreo
- Botellas rellenadas (número y tipo)
- Parámetros determinados en campo (pH, conductividad, etc.).

Además incluirán un apartado de observaciones en el que se anotará cualquier incidencia que pueda influir sobre el análisis o su interpretación, como:

- Presencia de turbidez o desprendimiento de gases.
- Olores o colores anormales o extraños.
- Presencia de actividades potencialmente contaminantes en los alrededores del punto de control.
- Otras observadores de interés (lluvias recientes, riegos, abonados, etc.).

2. APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE PRESERVACIÓN

Los métodos de preservación habitualmente empleados para la conservación de las muestras se suelen ajustar a las normas prescritas en los Standard Methods APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association), WPCF (Water Pollution Control Federation) y a las normas de la WPA (Environmental Protection Agency).

Con las técnicas de muestreo y almacenamiento de muestras de agua recomendadas, se pretende minimizar los efectos debidos al paso del tiempo y al cambio en las condiciones ambientales. Las muestras han de ser analizadas lo antes posible, no obstante conviene tomar precauciones para que no se alteren los parámetros de interés. Aunque la preservación total de las muestras es prácticamente imposible y no se consigue la completa estabilidad para todos los constituyentes, se pueden retardar los cambios químicos y biológicos que inevitablemente se producen en el agua durante su almacenamiento mediante la aplicación de técnicas de preservación.

Existe una gran variedad de métodos de preservación, que se limitan generalmente al control del pH, adición de sustancias químicas y refrigeración.

A modo de ejemplo, se incluyen aquí algunos reactivos utilizados para la preservación de muestras de agua, así como las técnicas de muestreo y preservación recomendadas para distintas especies, indicando el tipo de recipiente y tiempo de almacenamiento máximo.

TÉCNICAS DE PRESERVACIÓN

TÉCNICA DE PRESERVACIÓN	FUNCIÓN	ESPECIES PRESERVADAS
Refrigeración	Disminuye la precipitación Disminuye el metabolismo bacteriano Disminuye la oxidación de metales Disminuye el intercambio de gases con la atmósfera	Alcalinidad, acidez, nitrógeno y fósforo orgánicos, DQO, DBO, coliformes
Sales		
HgCl ₂ (cloruro mercuríco)	Inhibidor bacteriano	Fósforo y nitrógeno inorgánicos, DQO
ZnC ₂ O ₄ (acetato de zinc)	Precipita sulfuro disuelto como ZnS	S ²⁻
CuSO ₄ (sulfato de cobre)	Bactericida	Fenoles
Ácidos		
HNO ₃	Previene la oxidación de los metales Previene la precipitación de los metales como sulfuros, óxidos o carbonatos Previene la adsorción de los metales en las paredes de los recipientes	Metales pesados tales como Fe, Mn, Zn, Cu, etc.
H ₂ SO ₄	Inhibidor bacteriano Puede provocar la precipitación de yeso	DQO, aceites y grasas, carbono orgánico
Bases		
NaOH	Previene la pérdida de ácidos orgánicos volátiles Puede liberar amonio	Cianuros, ácidos orgánicos

TÉCNICAS DE MUESTREO Y PRESERVACIÓN RECOMENDADAS PARA ALGUNAS ESPECIES

Determinación	Recipiente	Preservación	Almacenamiento
Acidez	P	R	1 día
Alcalinidad	P	R	1 día
Arsénico	P	HNO ₃ (pH < 2)	6 meses
DBO	V	R	6 horas
DQO	P	H ₂ SO ₄ (pH < 2)	7 días
Cloruros	P	--	--
Cianuros	P	R + NaOH (pH 12)	1 día
Flúor	P	--	1 mes
Metales			
Calcio, Sodio, Potasio, Magnesio,		Para metales disueltos filtrar	
Mercurio	V	HNO ₃ (pH < 2)	1 mes
Nitrógeno Amon			
Fenoles	V	R + H ₃ PO ₄ (pH < 4) 1 g de CuSO ₄ /l	1 día
Fósforo	P	R	1 día
Sulfatos	P	R	--
Sulfuros	P	R + añadir 4 gotas de acetato de zinc 2N/100 ml + NaOH (pH > 9)	1 día
Sílice	P	R	1 mes

P = Plástico (polietileno o equivalente), V = Vidrio, R = Refrigeración

3. ANÁLISIS "IN SITU" DE CONSTITUYENTES INESTABLES

Algunas propiedades o constituyentes del agua subterránea pueden variar drásticamente en pocos minutos u horas después del muestreo. Consecuentemente, se requiere el análisis inmediato de estos parámetros o su preservación con algún tratamiento para los que no puedan ser analizados "in situ". Éste es el caso de parámetros como la conductividad eléctrica, la temperatura del aire y del agua, nivel piezométrico en los pozos y piezómetros, caudal en los manantiales, pH, oxígeno disuelto y CO₂ disuelto.

La gran variedad de equipos portátiles existentes en el mercado permite la realización de análisis muy precisos y exactos de algunos constituyentes o propiedades del agua en el mismo lugar de muestreo.

Cada una de las determinaciones in situ se realizará según su procedimiento normalizado de trabajo, donde quedarán especificados los aparatos a utilizar, su calibración, el grado de precisión, el modo de operación, y el sistema de control de calidad.

Temperatura

La temperatura del agua es un parámetro clave en estudios hidroquímicos, y requiere su medición inmediata después de emerger el agua en el punto de muestreo.

Como norma general, se medirá la temperatura del agua en el punto de salida con un termómetro de mercurio de precisión 0,5 °C, una vez establecido el equilibrio térmico entre éste y el agua. Además se tomarán medidas de la temperatura del aire en el punto de muestreo.

Conductividad eléctrica

La conductividad es un índice muy útil para conocer si se han producido alteraciones de importancia entre las condiciones de campo y laboratorio (precipitación de sales, contaminación accidental, etc.). Generalmente, para evitar las indeterminaciones causadas por la dependencia de la conductividad con la temperatura, las medidas se refieren a 25 °C.

Esta medida se realizará con una sonda provista de 4 electrodos de carbono

activado y conductivímetro equipado con compensador de temperatura, que proporciona los resultados directamente en S/cm a 25 °C. Los medidores disponibles en el mercado permiten en muchos casos disponer de cuatro rangos de medida, entre 0 y 200000 S/cm, con una precisión de 0,1 \square /cm.

4. TRANSPORTE DE LAS MUESTRAS

El transporte y conservación de las muestras hasta su llegada a los laboratorios de análisis se debe llevar a cabo siguiendo los procedimientos normalizados que en cada caso y, siguiendo las recomendaciones del laboratorio, resulten de aplicación.

No obstante, hay que indicar que de forma general, las muestras de aguas (a excepción de las destinadas para análisis isotópicos) se mantendrán refrigeradas a 4°C, evitando en cualquier caso que se rompa la cadena de frío.

En el procedimiento normalizado también constarán los reactivos necesarios para la estabilización de las muestras (reactivos recomendados por los Standard Methods o EPA, concentración y condiciones finales).

El tiempo transcurrido entre la toma de muestras y su llegada al laboratorio ha de ser lo más reducido posible. Esta circunstancia cobra especial importancia en la realización de algunos análisis como es el caso de amonio o nitritos.

5. DETERMINACIONES EN LABORATORIO

Se analizarán distintos parámetros, para cada muestra. De modo orientativo y, para facilitar la planificación del trabajo, se puede establecer una agrupación de parámetros como las que se expresan a continuación, aunque podrán realizarse modificaciones si se considera oportuno.

Nota: Las siguientes referencias son orientativas. Para cada caso concreto, consúltense la normativa vigente a fecha de realización del trabajo y los parámetros a analizar y límites máximos.

Control de Vigilancia: En base a lo establecido en el apartado 2.4 del Anexo V de la Directiva 2000/60/CE, en referencia a la selección de los parámetros a analizar dentro del control de vigilancia, se propone que se realicen las determinaciones abajo indicadas, que incluyen los "parámetros

esenciales" (contenido de oxígeno, valor del pH, conductividad, nitratos y amonio) y una serie de parámetros que ejerzan como indicadores de las repercusiones de los posibles factores que estén causando que una masa de agua esté en riesgo de no alcanzar el buen estado.

- Determinaciones básicas:
 - Cloruros
 - Bicarbonatos
 - Sodio
 - Sílice
 - Dureza
 - Sulfatos
 - Calcio
 - Potasio
 - Alcalinidad
 - Oxidabilidad (DQO)
 - Carbonatos
 - Magnesio
 - Fluoruros
 - Nitratos

- Determinaciones básicas de metales:
 - Hierro
 - Manganeseo
 - Cobre
 - Cinc
 - Aluminio

- Determinaciones de Contaminantes generales:
 - Amonio
 - Nitritos
 - Cianuros
 - Fosfatos
 - Carbono orgánico total

Control Operativo: Se llevarán a cabo las siguientes determinaciones:

- Determinaciones básicas:
 - Cloruros
 - Bicarbonatos
 - Sodio
 - Sílice
 - Dureza

- Sulfatos
- Calcio
- Potasio
- Alcalinidad
- Oxidabilidad (DQO)
- Carbonatos
- Magnesio
- Fluoruros
- Nitratos

- Determinaciones básicas de metales:
 - Hierro
 - Manganeso
 - Cobre
 - Cinc
 - Aluminio

- Determinaciones de contaminantes generales:
 - Amonio
 - Nitritos
 - Cianuros
 - Fosfatos
 - Carbono orgánico total

- Determinaciones complementarias de metales:
 - Arsénico
 - Boro
 - Selenio
 - Mercurio
 - Plomo
 - Bario
 - Cadmio
 - Cromo total
 - Níquel

- Plaguicidas:
 - Plaguicidas de las listas I y II

- Determinaciones complementarias de contaminantes:
 - Compuestos orgánicos volátiles, incluyendo como mínimo cuantificación de percloroetileno+, tricloroetileno y 1,2- dicloroetano.
 - Compuestos BTEX: (benceno-tolueno- etilbenceno-

- xileno), incluyendo como mínimo cuantificación de benceno.
- hidrocarburos policíclicos aromáticos, incluyendo como mínimo cuantificación de benzo(a)pireno y suma de benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, benzo(ghi)perileno, indeno(1, 2, 3-cd) pireno.
- Detergentes
- Fenoles
- Hidrocarburos disueltos o emulsionados

Control de abastecimientos poblacionales: Se llevarán a cabo las siguientes determinaciones:

- Determinaciones básicas:
 - Cloruros
 - Bicarbonatos
 - Sodio
 - Sílice
 - Dureza
 - Sulfatos
 - Calcio
 - Potasio
 - Alcalinidad
 - Oxidabilidad (DQO)
 - Carbonatos
 - Magnesio
 - Fluoruros
 - Nitratos
- Determinaciones básicas de metales:
 - Hierro
 - Manganeso
 - Cobre
 - Cinc
 - Aluminio
- Determinaciones de contaminantes generales:
 - Amonio
 - Nitritos
 - Cianuros
 - Fosfatos
 - Carbono orgánico total

- Determinaciones complementarias de metales:
 - Arsénico
 - Boro
 - Selenio
 - Mercurio
 - Plomo
 - Bario
 - Cadmio
 - Cromo total
 - Níquel

- Plaguicidas:
 - Plaguicidas de las listas I y II
 - PCBs

- Determinaciones complementarias de contaminantes:
 - Compuestos orgánicos volátiles, incluyendo como mínimo cuantificación de percloroetileno+, tricloroetileno y 1,2- dicloroetano.
 - Compuestos BTEX: (benceno-tolueno- etilbenceno-xileno), incluyendo como mínimo cuantificación de benceno.
 - hidrocarburos policíclicos aromáticos, incluyendo como mínimo cuantificación de benzo(a)pireno y suma de benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, benzo(ghi)perileno, indeno(1, 2, 3-cd) pireno.
 - Detergentes
 - Fenoles
 - Hidrocarburos disueltos o emulsionados

- Determinaciones de parámetros microbiológicos:
 - Coliformes totales
 - Coliformes fecales
 - Streptococos fecales
 - Salmonellas
 - Escherichia coli
 - Clostridium perfringens

6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados analíticos se deben tratar de forma tanto gráfica como numérica. En el primer caso, para la caracterización hidroquímica general se pueden utilizar distintos tipos de gráficos (Piper, Stiff, Schöeller, SAR-Conductividad), mapas de distribución espacial de algunos constituyentes o relaciones iónicas de interés, además de otros de evolución en el tiempo de distintos parámetros para los puntos que cuenten con registros históricos.

En cuanto a las técnicas numéricas de tratamiento de datos, se pueden emplear programas que permiten realizar un análisis estadístico descriptivo de los resultados.

La integración de los resultados hidroquímicos obtenidos junto con las características hidrogeológicas de cada Unidad Hidrogeológica, servirá en último término para conocer de forma global su funcionamiento, así como para evaluar los recursos disponibles, su aptitud para distintos usos, en función de la calidad química que presente el agua subterránea y efectos modificadores que haya podido sufrir en relación con el sentido de flujo.

La información obtenida de los análisis químicos debe quedar reflejada en la ficha de inventario correspondiente a cada punto, que a su vez será integrada en la base de datos del proyecto que a su vez, una vez analizada y depurada, puede emplearse para la realización de mapas hidroquímicos del ámbito de estudio mediante la utilización de algún Sistema de Información Geográfica.

7. ACTIVIDADES DE VIGILANCIA Y CONTROL DE LA OBRA.

1. CONCEPCIÓN DE LA VIGILANCIA Y EL CONTROL DE OBRA

Todo proyecto de pozo debería incluir, como cualquier proyecto de obra, el correspondiente Pliego de Condiciones Técnicas y, en su caso, cuando se trate de obras contratadas por alguna Administración o Entidad Pública, también el de Cláusulas Administrativas.

El mayor o menor desarrollo del Pliego será función del tipo de relación contractual que se establezca entre el propietario y el constructor.

2. TRABAJOS SISTEMÁTICOS DE CONTROL

Los trabajos sistemáticos de control comprenderán la comprobación de la conformidad de las obras con los documentos de proyecto, la normativa de obligado cumplimiento legal o contractual y las reglas de la buena práctica.

Corresponde básicamente a los siguientes:

- A. **Control del Plan de Aseguramiento de la Calidad (PAC)** específico para las obras, que será presentado por el adjudicatario y que será desarrollado a partir del general presentado en la licitación.
- B. **Control de ejecución de la obra:**
 - Comprobación de las circunstancias al comienzo de la obra (estado de los terrenos, accesos, maquinaria y acopio de materiales).
 - Control y asesoramiento durante la ejecución de los sondeos,

estado de las obras, especialmente en lo relativo a entubaciones, filtros, profundidad, cementaciones y en general a cualquier circunstancia no prevista en el proyecto).

- Realización de controles y ensayos técnicos que orienten la toma de decisiones, tales como:
 - Columna litológica de los terrenos atravesados.
 - Análisis granulométricos.
 - Control de lodos.
 - Control de la ejecución e interpretación de registros geofísicos.
- Control de las operaciones de desarrollo y limpieza y de toma de las muestras hidroquímicas.
- Control de la ejecución e interpretación de las pruebas de bombeo.

C. **Control de mediciones.**

D. Control presupuestario.

E. Control de programación.

F. Control de calidad de la propia obra ejecutada.

3. CONTROL DE LA EJECUCIÓN DE LA OBRA. INSPECCIÓN Y VIGILANCIA

La inspección y vigilancia de las obras de construcción de sondeos se realizará de acuerdo a los criterios habitualmente empleados en obra, refiriéndose al menos a:

- Comprobación del correcto emplazamiento del sondeo, de acuerdo a los criterios hidrogeológicos y de disponibilidad de parcelas. La localización exacta de los sondeos se realizará mediante la utilización de GPS y se obtendrá su situación con precisión centimétrica.
- Comprobación de las circunstancias al comienzo de la obra en cada emplazamiento: estado de los terrenos, accesos, permisos, licencias y autorizaciones de ocupación en vigor, etc.
- Comprobación de la calidad y características técnicas de la maquinaria y materiales a utilizar en la obra, de acuerdo con las previstas en el proyecto:

- Disposición a pie de obra de todos los equipos y medios necesarios para alcanzar un 20% más de la profundidad prevista en cada caso.
 - Exigencia de los certificados de las inspecciones reglamentarias a las que están sujetas las máquinas y equipos, y los certificados de las características técnicas o de calidad de los equipos menores (ganchos, eslingas, etc.) que se vayan a introducir en obra.
 - El estado y características de las accesos, balsas de detritus, evacuación de aguas e instalaciones de seguridad y salud. Se pondrá especial atención en la capacidad de las balsas de lodos, que deberán tener una capacidad aproximada de unas 2 a 3 veces el volumen del pozo a perforar, debiéndose construir con zona de decantación.
 - La calidad, características técnicas y adecuada cantidad de los acopios de tuberías, filtros, gravilla, cemento, etc., de las características especificadas, en cantidades suficientes y de calidades apropiadas.
- Asimismo se comprobará que el personal destacado a pie de obra por el Contratista es adecuado para la ejecución de las obras con arreglo al programa de trabajos.
 - Comprobación de la correcta instalación de las prestaciones previstas en el estudio de seguridad y salud, incluyendo:
 - Aprobación de los planes de seguridad y salud, comprobando que la aplicación de los principios de prevención y de los métodos de trabajo correctos.
 - Habilitación de la figura de un coordinador de seguridad y salud.
 - Planificación de los trabajos y coordinación de las actividades de las empresas concurrentes.
 - Control de acceso del personal y maquinaria a la obra.
 - Dar las instrucciones necesarias para el cumplimiento del Plan de Seguridad y Salud y advertir de los incumplimientos detectados.
 - Inspección de seguridad de las obras conforme a los requisitos del R.D. 1627/97.

- Gestión del libro de incidencias en obra, en el que se anotarán las incidencias que se produzcan como resultado de un incumplimiento de los criterios de prevención de la Ley 31/95.
 - Informes periódicos y su archivo.
 - Informes de accidentes e incidentes.
 - Informe final de obra.
- Inspección periódica de la obra. La frecuencia de las mismas se establecerá en función de una serie de aspectos como son:
 - Complejidad de ejecución de la obra.
 - Riesgos inducidos por el entorno.
 - Volumen de mano de obra.
 - Superposición de trabajos.
- Control y asesoramiento durante la ejecución de los sondeos (informes sobre el estado de las obras, especialmente a lo relativo a perforación, entubaciones, filtros, profundidad definitiva, cementaciones y en general a cualquier circunstancia no prevista en el proyecto).
- Realización de controles y ensayos técnicos que orienten la toma de decisiones, tales como:
 - Clasificación de los detritus y testigos de los terrenos atravesados. La testificación litológica se realizara a medida que progresa la perforación, puesto que de otra forma se corre el peligro de sobreperforar, atravesando terrenos indeseables. Con este criterio, la columna litológica se establecerá, al menos, diariamente. Para ello, se tomará una (1) muestra representativa de cada metro perforado, o bien cuando cambien las características de los terrenos atravesados. Parte de estas muestras quedarán en bolsas de plástico debidamente identificadas y etiquetadas con material no alterable. Simultáneamente se procederá a la extensión del resto de las muestras en el suelo en hileras como es tradicional. Las muestras deben inspeccionarse minuciosamente, indicándose su litología, aspecto, contenido en arenas y características subjetivas de

permeabilidad. Se debe prestar atención a la presencia de micas, yesos, margas y carbonatos, empleándose lupas y ácido clorhídrico.

- Estudio de las características litológicas de los terrenos atravesados y correlación crono y litoestratigráfica del tramo, incluyendo la descripción de las condiciones que afectan a la permeabilidad, tales como: pérdidas y variaciones del nivel de agua durante la perforación, heterogeneidad de los materiales, matriz, grado de carstificación y fracturación, etc.
- Toma de muestras para análisis granulométricos y análisis químicos, petrográficos, láminas delgadas, etc. Los análisis granulométricos se realizarán por tamizado de las muestras de los niveles permeables atravesados.
- Control de lodos. Se controlará periódicamente, la densidad, la viscosidad, costra y agua de filtrado, el pH y el contenido en arena:
 - **Densidad.** Su determinación se suele realizar pesando en una balanza de lodos (Baroid) un volumen conocido de lodo. El valor de la densidad debe habitualmente encontrarse entre 1.04 y 1.14.
 - **Viscosidad.** Se determina con el embudo y cazo Marsh, según normas API, expresándose por el tiempo (en segundos) que tarda en salir por un orificio calibrado un determinado volumen de lodo. Como cifras deseables para la viscosidad, los valores obtenidos deben estar entre 35 y 45 segundos.
 - **Costra y agua de filtrado.** La costra que forma un cierto lodo de perforación está relacionada con el agua libre de éste y con la impermeabilidad de aquella y se estima por el volumen filtrado en un ensayo normalizado. Ésta medida se realiza con un filtro prensa normalizado y, la experiencia señala que no se debe dejar pasar más de 10 cm³ de filtrado, durante 30 minutos con una presión máxima de 7 kg/cm², resultando un espesor de la costra cake de 2 mm.
 - **pH.** Se ha comprobado que, en general, un lodo bentonítico es estable cuando su pH está comprendido

entre 7 y 9,5 aproximadamente. Este parámetro se medirá con papeles indicadores de sensibilidad de 0.5 unidades.

- **Contenido de arena.** En un lodo, se considera arena a la fracción que queda retenida en un tamiz 200 (200 hilos por pulgada, equivalente a 0.074 mm). Para determinar la cantidad de arena de los lodos de perforación, se toma una muestra de lodo de 100 cm³, pasándola por una malla del tamiz de 200. El residuo retenido sobre el tamiz, después de lavado con agua, se vierte en un tubo de cristal calibrado en %, de 100 cm³ de volumen, expresándose el contenido de arena, no debiendo, ser superior al 2 ó 3 %.

- Control de la ejecución e interpretación de registros geofísicos. El equipo de testificación continua debe estar a pie de obra con la antelación suficiente para que una vez finalizada la perforación, comiencen los trabajos de testificación de forma inmediata. Suele requerirse que al menos se efectúen registros de gamma natural, potencial espontáneo, resistividad normal corta y larga, conductividad y temperatura. Los resultados de las testificaciones geofísicas y litológicas serán interpretados conjuntamente, si bien las conclusiones obtenidas por ambas técnicas deben ser coherentes, por lo que hay que tener presente que puede existir algún desfase en la profundidad asignada a los distintos tramos del terreno y que en ocasiones la testificación geofísica indicará tramos permeables que no fueron detectados mediante la testificación litológica. A partir de estos resultados se decidirán las características definitivas de la columna de entubado del sondeo:
 - Cambios recomendables en los diámetros de perforación y entubaciones auxiliares en función de las características de los materiales atravesados.
 - Localización y longitud de cementaciones.
 - La profundidad final de la obra en función de los objetivos marcados y los terrenos atravesados.
 - Localización y longitud de los tramos de tubería ciega y de filtro, a la vista de los materiales atravesados y los registros geofísicos realizados.

- Tamaño de la apertura de paso de los filtros y tamaño de la gravilla, según los análisis granulométricos.
- Control de la ejecución de pruebas de calidad de la obra: verticalidad y alineación, que deben realizarse simultáneamente al registro geofísico. El buzamiento de la estratificación, especialmente cuando se da en combinación con alternancia de durezas, supone siempre un riesgo de desviación del sondeo. Es por ello que en la perforación a rotación la presión sobre el útil de corte tiene mucha importancia, está debe darse siempre por medio de lastrabarrenas colocados inmediatamente sobre el útil de corte y de diámetro lo más cercano posible al del sondeo y nunca presionando sobre el útil de corte por medio del varillaje. Uno de los procedimientos para medir la verticalidad y alineación de un sondeo, consiste en introducir en el un instrumento de medida que en esencia consiste en una plomada y un disco-brújula graduado según círculos concéntricos. La posición de la plomada, para distintas profundidades queda registrada fotográficamente. Aunque también existen sondas en el mercado que miden la verticalidad mediante registro continuo, con medidas en cada punto de las coordenadas X, Y, Z, del punto del eje del sondeo y orientación geográfica gracias a un magnetómetro de posición. Se prestara especial importancia a la alineación, no superando la prueba de alineación aquellos sondeos en los cuales no pase un tramo de tubería de 12 m de longitud y diámetro ligeramente inferior al de la entubación, sin que roce en las paredes de ésta.
- Control de las operaciones de instalación de las tuberías de revestimiento:
 - Se controlarán la longitud y características de la columna de entubación, los tramos de rejilla y las características de la misma (longitud, tamaño de ranura y diámetro), según los niveles litológicos cortados y los registros geofísicos tomados. Finalmente, antes de proceder a su colocación, los tramos que la componen serán numerados por su interior y exterior, y no serán introducidos en el terreno, sin comprobar previamente que se ajustan a lo establecido en longitud, espesor y distribución de los tramos ciegos y filtro.
 - Se comprobaran minuciosamente las soldaduras realizadas y la ausencia de rebabas y perforaciones en las tuberías, el buen estado de limpieza y la alineación de los tramos soldados.

- Durante la introducción de la tubería se prestara atención a la correcta realización de las soldaduras, a que no se aplasten los tubos al no ser manipulados, que los filtros estén limpios, y que los tramos estén perfectamente alineados y enfrentados entre sí.
- Para que la tubería quede perfectamente centrada en la perforación se comprobara la utilización de centradores separados un máximo de unos 12 m. Estos deberán situarse también en los extremos inferior y superior de las zonas filtrantes.
- Se controlarán también las operaciones de engravillado y cementado del sondeo:
 - Engravillado: se comprobará que la grava cumple las prescripciones del proyecto y que su tamaño se adecua a la apertura de paso de los filtros, según los análisis granulométricos efectuados, cerciorándose de que su granulometría y composición es correcta, que se dispone de las cantidades necesarias y que su estado de limpieza es adecuado. Durante la operación de engravillado, se prestara especial atención a que no se produzcan paradas, a que la grava se introduzca lenta y regularmente, con o sin adición de dispersantes de arcillas, y a que no entren en el sondeo cuerpos extraños, comprobando al final de la operación que el volumen de grava introducida coincide con el calculado y que se ha alcanzado el nivel previsto.
 - Cementado. Se controlara a la hora de la cementación la dosificación aprobada por el Director de Obra, tanto para el cementado entre la tubería de emboquillado y el terreno natural y el cementado de la parte superior del espacio anular y los tramos que habrán de ser cementados, no permitiéndose ninguna operación en el sondeo durante los tiempos de fraguado.
- Control de las operaciones de desarrollo y limpieza del sondeo. Durante estas operaciones, se confirmará la extracción de todos los restos de lodos y detritus de perforación, y la correcta ejecución de los trabajos proponiendo al Director de la Obra el mejor método para el desarrollo (mediante aire comprimido, por pistoneo, por lavado a contracorriente,

bombeo intermitente y cuchareo, por sobrebombeo, etc.).

- Control de la toma de las muestras hidroquímicas.
- Control de la ejecución e interpretación de las pruebas de bombeo:
 - A la vista de los resultados del desarrollo y limpieza del sondeo, se procederá a la definición y propuesta de las características del equipo de bombeo, profundidad de aspiración, caudales y alturas de elevación probables para efectuar la prueba de bombeo.
 - Seguimiento y comprobación de las pruebas de bombeo, con indicación de las condiciones de bombeo y parámetros obtenidos: caudal, tiempo, nivel inicial, descenso, caudal específico, observaciones relevantes, etc. Durante el mismo y con la frecuencia que previamente se establezca, se tomarán y se enviarán para su análisis las muestras de agua que resulten indicadas. Además se controlara periódicamente, la evolución de parámetros físico-químicos del agua (pH, temperatura y conductividad).
 - También se supervisara que el agua extraída, circule por el camino previsto, evitando que pueda causar daños a terceros e infraestructuras.
 - Una vez concluidos los ensayos de bombeo se realizaran las interpretaciones necesarias para obtener los valores de parámetros hidráulicos que aporten las pruebas, obteniendo gráficos similares a los adjuntos al final del capítulo.
 - Los resultados de la prueba de bombeo y su interpretación se incluirán en el informe final.
- Comprobación de la adecuada desinfección del sondeo y que esta se realiza mediante hipoclorito sódico, en una dosificación que habitualmente es de 1 litro de hipoclorito por metro cúbico.
- Comprobación periódica de las unidades de obra ejecutadas y de la calidad y características técnicas de las mismas.
- Control y comprobación del ritmo real de la ejecución de las obras en relación con lo previsto en el Programa de Trabajos aprobado.

- Control y comprobación del gasto y de la valoración de las obras ejecutadas de acuerdo con los criterios de abono del PPTP del proyecto.
- Asesoramiento a la Dirección de Obra, a la vista de los resultados de la perforación y de las pruebas efectuadas, sobre las características constructivas definitivas de la obra:
 - Cambios recomendables en los diámetros de perforación y entubaciones auxiliares en función de las características de los materiales atravesados.
 - Localización y longitud de cementaciones.
 - Profundidad definitiva de la obra en función de los terrenos atravesados y del objetivo previsto para cada emplazamiento.
 - Localización y longitud de los tramos de tubería ciega y de filtro, a la vista de los materiales atravesados y los registros geofísicos realizados, y también sobre la apertura de paso de los filtros y tamaño de la gravilla, según los análisis granulométricos.
- Comprobación de la perfecta terminación de la cabeza y cierre del sondeo con arqueta con su placa identificativa. Asimismo, se supervisará la retirada de los equipos de perforación y la limpieza del entorno una vez finalizadas las obras, controlándose el relleno de los huecos de las balsas, la retirada de los acopios de terreno y adecuada gestión de los residuos generados y su retirada.
- Elaboración de informe final de supervisión y control de la obra en el que se incluirá una memoria descriptiva y el informe completo que contendrá las características y pruebas realizadas en cada sondeo. Se incluirán además:
 - Un análisis de los principales problemas surgidos durante la ejecución de las obras y una evaluación de la empresa constructora en materia de seguridad y salud laboral.
 - Un informe hidrogeológico monográfico de cada uno de los sondeos de acuerdo con el modelo establecido por el director de los trabajos; éste deberá contener al menos una breve descripción de la masa de agua subterránea en la que se

encuentra, referencia a su localización geográfica y geológica, observaciones hidrogeológicas destacables, características constructivas detalladas, columna litoestratigráfica atravesada, ensayos y testificaciones realizadas debidamente interpretados.

- La información de los partes y diagramas o gráficos de perforación elaborados por el contratista ejecutor de la obra.
- La información correspondiente de Seguridad y Salud:
 - Comunicaciones efectuadas al contratista de las obras.
 - Modificaciones que se hayan producido en el Plan de Seguridad.
 - Anomalías e incidencias acaecidas.
 - Relación de accidentes e incidencias.
 - Planificación de actividades.
- La información se presentará preferentemente de forma gráfica y resumida, con descripciones breves. De cada sondeo se presentará además una ficha, según el modelo que el director de los trabajos establezca, en la que se incluirán, además de la clasificación de los terrenos atravesados, los resultados de la prueba de bombeo, pruebas geofísicas y análisis químicos efectuados, y todos aquellos datos que se estimen relevantes sobre características y permeabilidad de los terrenos y perfil del sondeo. Se adjuntarán a la ficha las diagrafías, los datos y gráficos de ensayo de bombeo y los análisis químicos completos.

4. EJEMPLO DE PARTE DIARIO DE CONTROL DE SONDEO

Todas las indicaciones derivadas de la inspección y vigilancia, quedaran registradas en un parte diario de control de sondeo según figura adjunta, en el cual además también se indicará detalladamente diámetro, avance, litología de materiales perforados, parámetros de control de lodos, paradas, tipo y cambios de herramienta de corte, formación de la sarta y peso, así como de cuantas incidencias se produzcan en cada turno de trabajo.

PARTE DIARIO DE CONTROL DEL SONDEO

DATOS DE IDENTIFICACIÓN DEL PERSONAL

Nombre: _____ Fecha: _____
 Hora de llegada: _____ Hora salida: _____ Horas de Trabajo: _____

DATOS DE IDENTIFICACIÓN DEL SONDEO

Número: _____ Denominación: _____
 Sector: _____

PERFORACIÓN

A) ESTADO DE PROFUNDIDADES:

	Del sondeo (m)	Entubaciones		Observaciones	
		Diámetro	Diámetro		
Al comienzo de la jornada					
Al final de la jornada					
Avance obtenido					

B) CARACTERÍSTICAS DE LA PERFORACIÓN:

Diámetro utilizado: _____ mm Revoluciones por minuto: _____ rpm
 Perforación efectuada: _____ m Presión sobre corona: _____ Kg
 Tiempo de avance: _____ horas Caudal de agua: _____ l/min
 Composición de la sarta: _____

Croquis:

CONTROL DE LODOS

Hora	Turno	Parámetros						Observaciones
		Densidad (g/cm ³)	Viscosidad (s)	Filtrado (cm ³)	Cake (mm)	pH	Arena %	

OTRAS ACTIVIDADES

(Acondicionamiento, construcción de balsas, perforación a percusión, cementación, paradas, testificación, entubado, engravillado, desarrollo y limpieza, ensayos de bombeo, etc)

Explicación:

CONTROL DE SUMINISTROS

A) INVENTARIO DE FILTROS Y TUBERÍAS

	Espesor mm			Espesor mm		
	Longitud del tubo (m)	Número tubos	Longitud total (m)	Longitud del tubo (m)	Número tubos	Longitud total (m)
Filtro						
Tubería ciega						
	Longitud total tubería ciega			Longitud total tubería ciega		

B) INVENTARIO DE GRAVA CALIBRADA

Volumen de grava calibrada: m³

Peso de grava calibrada: Kg

C) MATERIAL SUMINISTRADO DURANTE LA JORNADA

OBSERVACIONES

5. CONTROL DE MEDICIONES

A partir de las actas del control dimensional de aceptación de los elementos de obras, se establece el estado de mediciones de la obra, acumulado a origen, que debe ser actualizado mensualmente.

En el informe mensual de control de mediciones debe incluirse el análisis de las diferencias que puedan surgir en relación con las mediciones del proyecto aprobado.

6. CONTROL PRESUPUESTARIO

A partir del control de mediciones anteriormente mencionado, se elabora la relación valorada que servirá de base a las certificaciones mensuales.

En el documento mensual de control presupuestario se incluyen aquellos elementos de obra o partidas presupuestarias que no se acrediten para su abono al contratista, tanto si es por discrepancias en los criterios de valoración entre éste y la dirección de las obras como si es por otras razones, además de aquellas reclamaciones, presuntas deudas o créditos que se hubieran producido durante la ejecución de las obras.

También se incluirán aquellas partidas que, ordenadas por la propiedad (ensayos de contraste, asesoría exterior, etc.), deban ser abonadas por ó a la empresa contratista.

7. CONTROL DE PROGRAMACIÓN

A partir de la información extraída del control de las mediciones y el control presupuestario de la obra, se establece el estado de ejecución de la obra comparando con el Programa de trabajos vigente y analizando el grado de cumplimiento del Programa, las desviaciones producidas y su incidencia sobre los plazos parciales y el plazo final de ejecución de las obras, las causas de tales desviaciones y las medidas a tomar para su corrección.

Se debe analizar la adecuación del ritmo de ejecución de las obras y sus certificaciones a las anualidades previstas proponiendo, en su caso, los oportunos reajustes de anualidades.

En cualquier caso, se informarán las prórrogas de contrato solicitadas por el contratista, analizando las causas de los retrasos y su imputación.

8. CONTROL DE CALIDAD

Las operaciones de control de calidad propiamente dichas consisten en la verificación de las condiciones estructurales y funcionales de los elementos de obra y su conformidad con las prescripciones del proyecto y de la normativa aplicable.

9. PLAZOS DE EJECUCIÓN ORIENTATIVOS

Se consideran 3 tipos de sondeos en función de la profundidad de perforación:

- Someros: hasta 100 m. de profundidad.
- Medios: hasta 200 m. de profundidad.
- Profundos: más de 200 m. de profundidad.

Se considera que la duración media de los trabajos de perforación para la ejecución de estos sondeos, teniendo en cuenta la profundidad y el sistema de perforación utilizado en cada caso, será:

- hasta 100 m de profundidad: 9 días.
- hasta 200 m de profundidad: 12 días.
- más de 200 m de profundidad: 7,5 días.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADIF (2008) "Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares para la Contratación de Servicios de Consultoría y Asistencia Técnica para la Redacción del Estudio Hidrogeológico del Corredor Norte – Noroeste de Alta Velocidad.

Anónimo (2007). "Pliego de Prescripciones Técnicas de la Asistencia Técnica para la investigación de los acuíferos profundos en la cabecera de la cuenca del Tajo. Zona de Entrepeñas y Buendía". Ministerio de Medio Ambiente, Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad. Dirección General del Agua. Confederación Hidrográfica del Tajo.

Anónimo (2005). "Pliego de Prescripciones Técnicas de la Asistencia Técnica para la Inspección y Vigilancia de las Obras de Construcción de Sondeos e Instalación de la Red Oficial de Aguas Subterráneas de la Cuenca del Ebro". Ministerio de Medio Ambiente. Confederación Hidrográfica del Ebro.

Anónimo (2006). "Pliego de Prescripciones Técnicas de la Asistencia Técnica para la Dirección de Obra del Proyecto de Instalación de Redes Oficiales de Control de Aguas Subterráneas, Piezometría y Calidad. Unidades Hidrogeológicas nº 7, 10, 13, 14, 15, 16, 18 y 19. Cuenca del Duero.". Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General del Agua. Confederación Hidrográfica del Duero.

Anónimo (2006). "Pliego de Prescripciones Técnicas de la Asistencia Técnica para la Inspección y Vigilancia de las Obras de Construcción de Sondeos e Instalación de la Red Oficial de Control de Aguas Subterráneas de la Cuenca Hidrográfica del Guadiana". Ministerio de Medio Ambiente. Confederación Hidrográfica del Guadiana.

Anónimo (2006). "Pliego de Prescripciones Técnicas de la Asistencia Técnica para la Inspección y Vigilancia de las Obras de Construcción de Sondeos e Instalación de la Red Oficial de Control de Aguas Subterráneas de la Cuenca Hidrográfica del Tajo". Ministerio de Medio Ambiente. Confederación Hidrográfica del Tajo.

Anónimo (2006). "Pliego de Prescripciones Técnicas de la Asistencia Técnica para la Inspección y Vigilancia de las Obras de Construcción y Acondicionamiento de Sondeos para la Red Oficial de Control de Aguas Subterráneas de la Cuenca Hidrográfica del Segura". Ministerio de Medio Ambiente. Confederación Hidrográfica del Segura.

Anónimo (2006). "Pliego de Prescripciones Técnicas de la Asistencia Técnica para la Inspección y Vigilancia de las Obras de Construcción de Sondeos e Instalación de la Red Oficial de Control de Aguas Subterráneas de la Cuenca Hidrográfica del Norte". Ministerio de Medio Ambiente. Confederación Hidrográfica del Norte.

Canal de Isabel II (2004). "Normas para el Abastecimiento de Agua. Revisión 2004". Comunidad de Madrid.

Loaso Vierbücher, C. (s.d.). "Permisos, trámites y proyectos para la captación y uso de las aguas subterráneas". ITGE – Aguas subterráneas y Abastecimiento Urbano.

García Ruiz, T. (2009). "Técnicas de construcción de Sondeos de aguas subterráneas". Jornadas Técnicas sobre Aprovechamiento de Aguas Subterráneas para Riego. Centro Nacional de Regadíos.

Maillo Calzada, I (2007). "Proyecto de construcción de sondeos para la adecuación de las redes de piezometría y calidad de las aguas subterráneas. Cuenca del Tajo". Ministerio de Medio Ambiente, Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad. Dirección General del Agua. Confederación Hidrográfica del Tajo.

Martin Muñoz, Aurelio (1977). "Técnica de sondeos Hidrogeológicos y de Investigación Minera". Fundación Gómez Pardo (Madrid).

Torán Busutil, M. (2005). "Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares de la Asistencia Técnica para la Explotación de la Red de Control de la Calidad de las Aguas Subterráneas en el ámbito de actuación de la Confederación hidrográfica del Júcar". Ministerio de Medio Ambiente, Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad. Dirección General del Agua. Confederación Hidrográfica del Júcar.



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
E.T.S. DE INGENIEROS DE MINAS
DEPARTAMENTO DE EXPLOTACIÓN DE RECURSOS MINERALES Y
OBRAS SUBTERRÁNEAS



POLITÉCNICA