

## **ENSAYOS DE BOMBEO EN POZOS**

Tomás García Ruiz  
**CGSi**

Febrero 2019

### **1. OBJETIVOS DEL ENSAYO**

Una vez finalizada una obra de captación hidrogeológica es imprescindible proceder a la realización de un ensayo de producción o aforo del pozo, comúnmente denominado ensayo de bombeo, para proceder a su evaluación cuantitativa y cualitativa.

El ensayo de bombeo de un pozo es una operación que supone el empleo de recursos económicos y es por ello necesario obtener la mayor información posible de la prueba, por lo que, además de programarla adecuadamente, conviene verificar la disponibilidad en la zona de piezómetros de control para registro de la evolución de niveles de agua, pues en un piezómetro se pueden obtener datos de gran interés para conocer el funcionamiento hidrodinámico de un acuífero.

El interés en la realización de estos ensayos viene determinado por constituir una herramienta fundamental para la optimización y correcta gestión de la captación hidrogeológica, lo que se traducirá en un importante ahorro energético en la extracción del agua subterránea y en el aumento de la vida útil, tanto del pozo, como de su equipamiento electromecánico.

La realización de un ensayo de bombeo permite la consecución de los siguientes objetivos (figura 1):

- Realizar una limpieza final del pozo, e incluso un desarrollo del mismo. De esta forma podrán extraerse residuos de la perforación y finos de las formaciones atravesadas, y estabilizando, en su caso, el paquete de gravas del anular del engravillado. Esta operación va dirigida a aumentar la vida útil de los equipos de bombeo y disminuir las pérdidas de carga hidráulica de la captación.
- Evaluar los parámetros hidrodinámicos del acuífero, tales como la transmisividad, el coeficiente de almacenamiento (si se dispone de piezómetros de control), así como otras características del dominio hidrogeológico, como puede ser el carácter de libre o confinado del acuífero, existencia de bordes impermeables, etc. Toda esta información es muy importante de cara a la modelización geológica y matemática del acuífero y el establecimiento de los criterios de gestión del sistema desde el punto de vista de la planificación hídrica.
- Obtener muestras de agua del acuífero para poder determinar la calidad de las mismas mediante su análisis químico y microbiológico y, como consecuencia de los resultados del mismo, su idoneidad para su empleo según los distintos usos y, en su caso, poner de manifiesto la necesidad de tratamientos correctores posteriores.

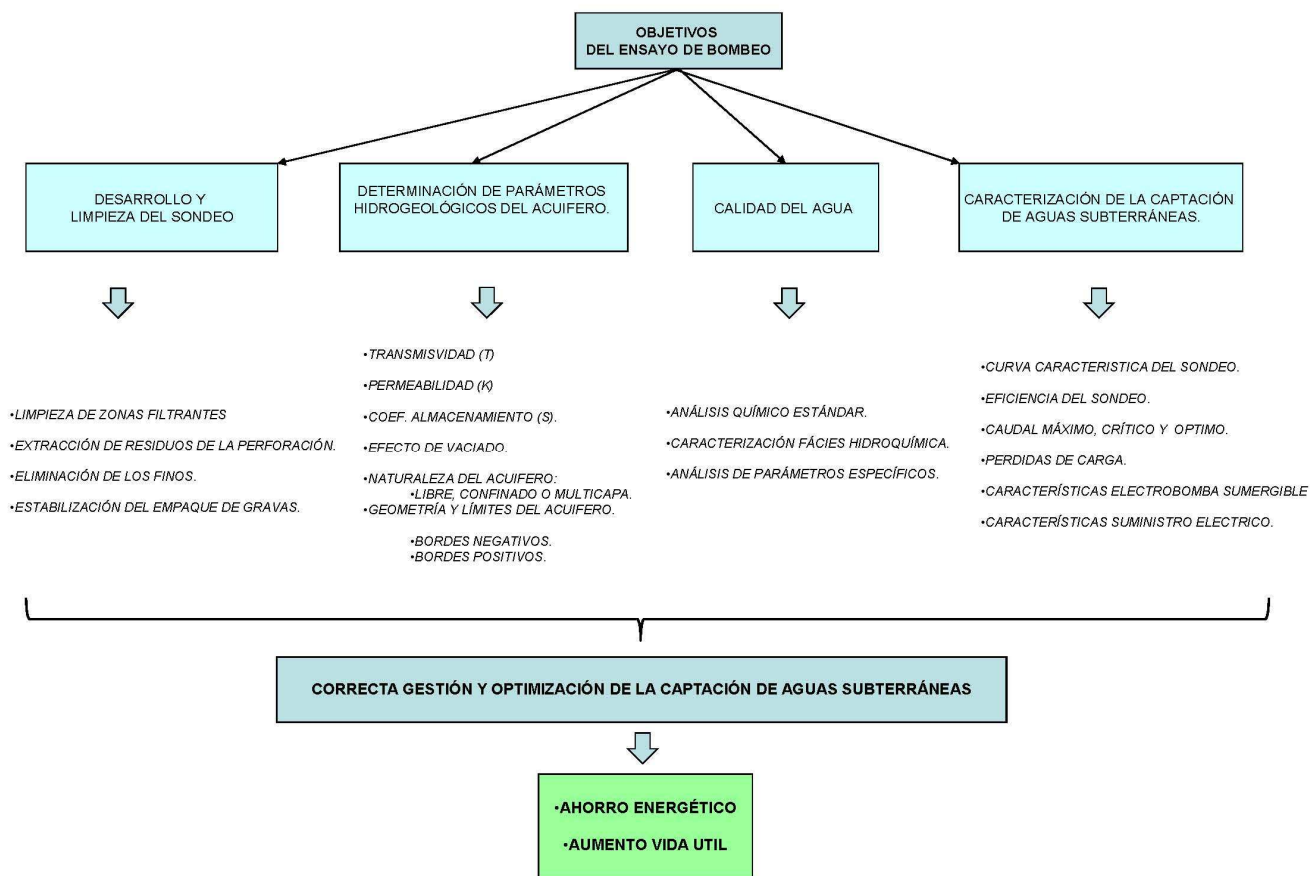


Figura 1.- Objetivos de un ensayo de bombeo

- Caracterización de la captación de aguas subterráneas de cara al diseño de su equipamiento electromecánico. Entre la información que se obtiene para este diseño se puede destacar la caracterización de la curva de respuesta caudal-descenso de la captación, las pérdidas de carga y el caudal óptimo de explotación para poder diseñar los equipos electromecánicos (bomba, tubería, instalación eléctrica, etc.) que sean más adecuados para la extracción de agua del pozo.



*Figura 2.-Limpieza de pozo durante la fase de aforo escalonado.*

## **2. MEDIOS HUMANOS Y MATERIALES NECESARIOS PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO**

### **2.1. EQUIPO TÉCNICO**

Es fundamental la presencia de un hidrogeólogo en las tres fases que requiere todo ensayo de bombeo: Planificación previa, desarrollo de la prueba en campo, e interpretación con el informe final, donde se recogerán los resultados, conclusiones y recomendaciones.

Para la realización de la prueba será preciso contar con la colaboración de una empresa especialista en este tipo de pruebas. Normalmente la empresa aforadora pone a disposición del ensayo a dos operarios que realizan el control de los caudales y la medición de los niveles piezométricos de acuerdo con las instrucciones del hidrogeólogo. Es el hidrogeólogo el responsable de tomar todas las decisiones que vayan siendo oportunas, según las incidencias que vayan produciéndose durante el desarrollo del ensayo.

A veces, según sea el número de piezómetros a controlar durante la prueba de bombeo, es necesario contar con personal auxiliar que lleve a cabo la medición de los datos de nivel de los distintos puntos de observación de que se dispone.

## 2.2. MEDIOS MATERIALES

Los equipos electromecánicos que habitualmente se utilizan para realizar un ensayo de bombeo con los que cuenta la empresa especialista en aforos son, entre otros, los siguientes:

### - Equipos de bombeo:

Los equipos de bombeo de agua subterránea que utilizan para estos ensayos la práctica totalidad de las empresas especialistas en aforos son las electrobombas sumergibles, que a su vez son los que habitualmente en la actualidad se emplean para el equipamiento definitivo de los pozos.



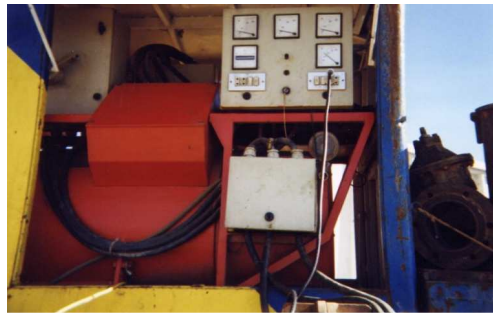
**Figura 3.-Electrobomba sumergible.**

### - Columna de impulsión:

Normalmente la columna de impulsión está constituida por tubería metálica embridada que se une a la tubería final de descarga situada en superficie, en general de mayor diámetro, mediante un acoplamiento formado por un codo de 90º y el correspondiente carrete.

### - Instalación eléctrica:

Para el suministro de energía a la electrobomba se utiliza un grupo electrógeno montado sobre camión. Para el control de la electrobomba se emplea un regulador de frecuencia y de tensión, actuando directamente sobre las revoluciones del motor de combustión interna que acciona el grupo. La instalación eléctrica debe estar convenientemente protegida y puesta a tierra.



**Figura 4.- Cuadro de protección y control de la instalación eléctrica de un ensayo de bombeo.**

- Elementos para el control de caudales:

En un ensayo de bombeo la medición de caudales se realiza mediante aforador, con diafragmas y tubo pitot.



**Figura 5.-Aforador y tubo pitot para medición de caudales.**

Para el ajuste del caudal se utiliza el control de revoluciones del motor que acciona el grupo electrógeno y la válvula de compuerta situada en la cabeza de la impulsión.

- Control de niveles piezométricos:

Durante el aforo, para el control de niveles piezométricos, tanto en el pozo de bombeo como en los piezómetros de que se disponga, se utiliza un hidronivel con un indicador luminoso y/o acústico.



**Figura 6.- Hidronivel utilizado para control en un sondeo piezométrico.**

Alternativamente, y/o en el caso de un gran número de puntos a registrar se pueden utilizar para este control los sensores de medida piezométrica continua. Para ello es preciso utilizar también los sensores de compensación barométrica y los dispositivos de registro de las medidas piezométricas, denominado “Data Loggers”, cuyos datos después deben ser volcados al ordenador, mediante el software específico.

- Elementos para medidas de parámetros físico-químicos “in situ” y muestreo para análisis en laboratorio del agua bombeada:

Para la realización de las medidas físico químicas “in situ” del agua bombeada es preciso contar con equipos portátiles de medición. Los aparatos portátiles fundamentales son conductivímetro, pH-metro, medidor de potencial redox (Eh-metro) y termómetro. Previamente a su utilización en campo todos los aparatos deben ser debidamente calibrados, de acuerdo con las instrucciones del fabricante para dicho proceso.

Para la toma de muestras es preciso contar con los correspondientes recipientes para su posterior envío al laboratorio de análisis químicos, y, en su caso, microbiológicos. Estos envases deben ser del volumen adecuado y, si es preciso, acondicionados con los reactivos correspondientes y sus envases de vidrio.

Todas las muestras recogidas para análisis en laboratorio deben ser preservadas, evitando su degradación por efecto de la temperatura, mediante la utilización de neveras portátiles y enviadas al laboratorio de análisis a la mayor brevedad posible.

- Equipos Informáticos:

La disposición de un ordenador portátil en campo, implementado con software específico para interpretación de ensayos de bombeo, permite ir evaluando los resultados que se vayan obteniendo, según se va realizando el ensayo, y de esta forma ir comprobando la bondad de ajuste a los modelos matemáticos analíticos que se utilizan para el cálculo de los valores de los parámetros hidrodinámicos. De esta forma, durante la duración del ensayo, se podrán obtener criterios razonables a la hora de tomar decisiones sobre la duración de una determinada etapa en la fase de ensayo escalonado, incremento de caudal, duración de la prueba a caudal constante, duración del periodo de recuperación, etc.

También la implementación en el ordenador portátil del software de lectura del “Data-Logger” permite el volcado de los datos del registro continuo de los sensores piezométricos conectados al mismo

- Otros equipos:

Para la realización del ensayo es preciso disponer de los elementos habituales de trabajo del hidrogeólogo en campo: GPS para posicionamiento y medida de las coordenadas de los puntos, vehículo, teléfono móvil, etc.

### **3. Planificación del ensayo**

Previamente a la realización del ensayo de bombeo es preciso definir el alcance de la prueba, su duración, la metodología y la sistemática de control del ensayo a realizar.

Además de la recopilación de información hidrogeológica de la zona donde se ubica el punto a ensayar, es conveniente el reconocimiento de la zona por parte del hidrogeólogo responsable del ensayo.

Esta visita previa permitirá, en primer lugar conocer las condiciones topográficas del entorno, pues es muy importante tener previsto el sistema de desagüe de los volúmenes de agua subterránea que se extraigan en el ensayo, identificando aspectos tales como la necesidad de utilización de balsas impermeabilizadas y/o tuberías de descarga con vertido lejos del punto de bombeo que impida la recirculación de los caudales bombeados hacia el interior del pozo. También podrán determinarse las zonas de posible encharcamiento que pudiera afectar a vías de comunicación cercanas y/o causar perjuicios a propietarios de fincas próximas, con el fin de poder adoptar las medidas preventivas adecuadas (limpieza de cunetas, selección de la ubicación de los puntos de descarga en función de las pendientes del terreno, etc.).

Además, en esta visita el hidrogeólogo podrá identificar algún punto de agua que, en función de su distancia y de sus características fuera conveniente incluirlo en el conjunto a controlar durante el ensayo de bombeo, bien sea de forma manual o bien mediante la instalación de sensores de medición en continuo.

Respecto a la duración del ensayo lo más adecuado sería considerar en principio una duración del ensayo de 24 horas de bombeo, considerando tanto la fase de aforo escalonado como la de bombeo continuo. La duración del periodo de recuperación debe ser al menos un tercio de la duración del periodo de bombeo con el fin de poder disponer de datos adecuados para su interpretación.

### **4. Desarrollo de la prueba**

Como ya se ha indicado es fundamental antes de comenzar la prueba garantizar la evacuación del agua hasta un cauce superficial para evitar causar encharcamientos que pudieran producir daños en las fincas colindantes a la ubicación del pozo. En algunas ocasiones, dada la proximidad a un cauce superficial, el vertido de agua se realiza directamente sobre dicho cauce, como es el caso recogido en la figura 7. En caso necesario es preciso realizar una canalización desde el pozo hasta el cauce superficial más cercano, bien por excavación de un pequeño canal impermeabilizado o bien mediante una conducción con manguera flexible, para evacuación del caudal bombeado.



**Figura 7.-Descarga directa de un ensayo de bombeo a cauce superficial.**

Durante el desarrollo del aforo es necesario efectuar un control riguroso y continuo de la los correspondientes registros piezométricos, mediciones de caudales y muestreo para análisis “in situ” y en laboratorio de las muestras recogidas.

Aunque la duración mínima del bombeo propuesta en el apartado anterior es de 24 horas, serán los propios resultados que se vayan obteniendo durante el ensayo los que indicarán sobre la conveniencia de la duración final de la prueba.

La prueba se realizará inicialmente mediante ensayos escalonados, partiendo del caudal mínimo medible de la bomba e incrementando progresivamente los caudales hasta su estabilización para poder establecer la curva de respuesta del acuífero. Durante este periodo es preciso incrementar los caudales de manera suave y controlada, evitando descensos bruscos que pudieran dar lugar en terrenos detríticos a la formación de puentes y golpes de grava del empaque anular que pudieran colapsar la tubería de revestimiento y arruinar la obra, dejando atrapada en el interior del pozo la bomba y el equipamiento electromecánico del ensayo. Como datos de referencia podemos tomar un descenso en el nivel de agua medido en el pozo de bombeo de 10 m en una hora como límite de seguridad. La fase de aforo escalonado se prolonga hasta llegar al caudal crítico, o antes del mismo si ya se dispone de escalones suficientes y se ha rebasado ampliamente el caudal de explotación proyectado.

Una vez se establezca el caudal se procederá al mantenimiento de la prueba con ese caudal constante hasta el final del ensayo. Esta es la segunda fase del aforo que corresponde a un bombeo a caudal constante, cuya interpretación permitirá conocer los valores de los parámetros hidrodinámicos del acuífero.

Durante la realización de la prueba se medirán “in situ” datos de conductividad, pH, Eh y temperatura de muestras de agua subterránea obtenidas en cada uno de los escalones estabilizados y también cuando se produzcan fenómenos que supongan variaciones organolépticas en el agua bombeada (cambio de color, presencia de olor, arrastre de finos, etc.). Se tomarán muestras en los distintos escalones para el envío al laboratorio de análisis de las que finalmente se consideren de mayor interés.



Finalmente en el periodo de bombeo a caudal constante se irán tomando varias muestras de agua, con sus correspondientes medidas “in situ”, y en instantes próximos al final de la prueba se tomará la muestra que se considera como la más representativa de las características químicas del acuífero en el pozo ensayado.

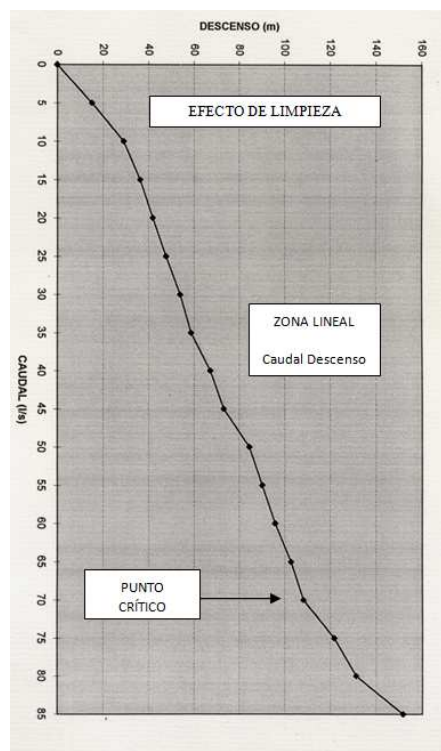
Las muestras obtenidas serán introducidas y conservadas en neveras, y enviadas lo antes posible al laboratorio para su análisis.

Una vez finalizada la prueba de bombeo se procederá a la medición de la recuperación de niveles. Esta etapa es fundamental pues no sólo permite conocer los valores de los parámetros hidrodinámicos, sino que también da información sobre los posibles efectos de vaciado del acuífero por el bombeo y su posible extensión.

## 5. Interpretación de los resultados e informe Final

Una vez se disponga de los datos de caudales y descensos en los distintos puntos de control del ensayo de bombeo y de los resultados del análisis químico se estará en disposición de efectuar la evaluación de la captación ensayada, tanto desde el punto de vista cuantitativo como cualitativo.

En primer lugar se representa gráficamente los resultados obtenidos durante la fase de aforos escalonados, en función de los pares de datos caudal y descenso estabilizado en cada escalón. Esta representación se conoce con el nombre de curva característica y para un pozo genérico presenta una forma semejante a la recogida en la figura 8.



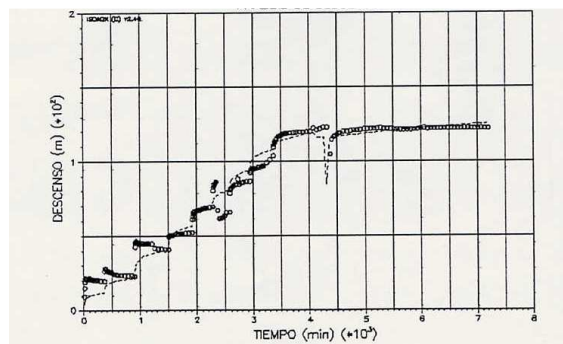
**Figura 8.- Curva característica correspondiente a un ensayo de bombeo.**

Generalmente la curva característica de un ensayo de bombeo, como el de la figura anterior, tiene una morfología que viene definida por tres partes bien diferenciadas de la gráfica que se describen a continuación.

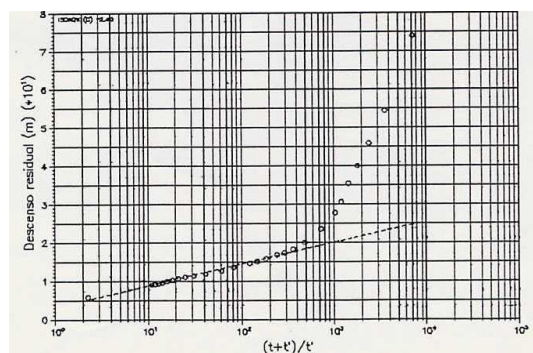
- En un primer tramo la curva presenta una mayor pendiente con un punto de inflexión. Esta etapa corresponde al bombeo con caudales bajos, en los que se produce un efecto de limpieza en el pozo, que se manifiesta a la finalización de este periodo.
- Después comienza el segundo tramo en el que se presenta una linealidad entre caudales y descensos. Esta etapa suele ser la de mayor duración y es la que establece la capacidad del acuífero en cuanto determina el rendimiento específico, en l/s/m, como valor de la pendiente de ese tramo recto.
- Finalmente llegamos a un nuevo punto de inflexión, denominado “punto crítico”, que es el que marca el caudal máximo de bombeo de un pozo, puesto que a partir de ahí se producen descensos en los caudales específicos.

La interpretación del ensayo de bombeo desde un punto de vista hidrogeológico se realiza fundamentalmente a partir del bombeo realizado a caudal constante, en la segunda fase del aforo.

En las siguientes figuras 9 y 10 se presenta, a modo de ejemplo, un ajuste numérico durante el periodo de bombeo y recuperación que permite obtener los valores de distintos parámetros hidrodinámicos (transmisividad, coeficiente de almacenamiento, etc.) y otros datos de interés como son detección de efecto de vaciado, barreras, límites de recarga, etc.



**Figura 9.- Ajuste numérico de los descensos producidos a caudal constante.**



**Figura 10.- Ajuste numérico de los descensos residuales en recuperación.**

Para llevar a cabo la interpretación de la evolución observada de descensos se pueden emplear distintas aplicaciones informáticas que recogen la metodología analítica utilizable en este tipo de ensayos, incorporando a la formulación matemática habitualmente utilizada todos los matices y circunstancias que pudieran haberse desarrollado durante el ensayo. No obstante muchos de los procesos de cálculo se pueden implementar sin excesivas complicaciones en el entorno de una hoja de cálculo de tipo EXCEL.

Los análisis químicos realizados contemplarán siempre los elementos mayoritarios (cationes y aniones) pues estos elementos son los habituales en estudios hidrogeológicos pues ponen de manifiesto la denominada facies hidroquímica que permite identificar, en su caso, la pertenencia de distintas muestras de agua subterránea a un mismo acuífero. Para tener un primer diagnóstico sobre la calidad del agua es recomendable el análisis de nitratos, así como otros componentes que se consideren de especial interés de acuerdo con el carácter de la investigación hidrogeológica. Además de estos análisis básicos, y en función del uso previsto del agua bombeada, se realizará toda la analítica prevista en la normativa correspondiente que, en el caso de abastecimiento humano, deberá recoger los análisis microbiológicos correspondientes.

Aún cuando el destino del agua no sea el abastecimiento humano siempre resulta muy útil comparar los resultados obtenidos con los referentes de calidad que se recogen en la Reglamentación Técnico Sanitaria, vigente en nuestro país. De esta forma podrán conocerse los componentes analizados que rebasen los niveles guías y las concentraciones máximas admisibles, poniendo de manifiesto, en su caso, la necesidad de tratamientos posteriores del agua bombeada. Al comparar la evolución de los distintos parámetros en las diferentes muestras analizadas se puede conocer la posible influencia del bombeo sobre la concentración de los mismos.

Muchas veces la interpretación de los datos de los análisis del agua bombeada permiten no sólo conocer su calidad sino también establecer hipótesis en cuanto al funcionamiento del acuífero en el entorno del pozo (variación de conductividad con la profundidad de nivel, anomalías de gradientes de temperatura, etc.).

La interpretación integrada de todos los datos recogidos, tanto hidroquímicos como hidrodinámicos, se plasmará en el Informe Final, donde se integrarán los resultados obtenidos con criterios geológicos, piezométricos, hidrodinámicos y de calidad química. La labor del hidrogeólogo será fundamental para dar coherencia a todos estos datos y firmará el mismo como responsable del informe.

En este documento se incluirán todas las conclusiones y recomendaciones referentes al ensayo de bombeo realizado.

Entre las conclusiones y recomendaciones que deben figuraren el Informe Final cabe destacar las siguientes:

- Datos hidrogeológicos obtenidos: Valores de los parámetros hidrodinámicos y facies hidroquímicas. Hipótesis sobre el funcionamiento del acuífero en el entorno del pozo. Propuesta con relación a nuevas captaciones en la zona.
- Caudal y régimen de explotación recomendado para la extracción de agua del pozo.
- Características que debe reunir el equipamiento electromecánico del pozo.
- Idoneidad del agua según el uso previsto. Propuestas de tratamiento en su caso.