

**PROCESOS DE INCRUSTACION Y CORROSION EN SONDEOS DE
CAPTACION DE AGUAS SUBTERRANEAS:
TECNICAS DE DIAGNOSTICO Y SISTEMAS DE REGENERACION**

Juan MARTINEZ RUBIO
Jefe de Departamento de Hidrogeología de TRAGSATEC

1.- INTRODUCCION

Si consideramos las captaciones de agua subterránea como una obra civil más, resulta evidente que, como en la inmensa mayoría de éstas, pueden estar afectadas por procesos de "envejecimiento" que limitan su vida operativa. Por esto, la planificación de trabajos de control y mantenimiento deberán tenerse en cuenta a la hora de proyectar y construir cualquier obra de este tipo.

Entrando en el capítulo concreto de los sondeos, como captación-tipo más frecuente, nos encontramos con que este tipo de obras suelen realizarse con un bajo nivel de control técnico, y con diseños que priman el bajo coste de ejecución muy por encima de la calidad constructiva.

La imposibilidad técnica de acceder a su interior ha llevado a un tradicional desconocimiento sobre las "enfermedades" que afectan al sondeo y su entorno, achacándose a causas "naturales" el deterioro y pérdida de rendimiento envejecimiento y muerte de los sondeos.

Los avances tecnológicos de las últimas décadas, y la progresiva toma de conciencia sobre el valor y vulnerabilidad de los recursos hídricos subterráneos, han favorecido la investigación y desarrollo de técnicas de diagnóstico, análisis y tratamiento regenerativo de los sondeos.

Paralelamente se ha avanzado en cuanto a técnicas de perforación, desarrollo, ... y materiales de acondicionamiento de los sondeos, con vistas a optimizar la captación de los recursos y minimizar los efectos negativos de la interacción entre la obra y el entorno geológico.

2.- SINTOMÁTICA Y SISTEMAS DE DETECCIÓN/DIAGNÓSTICO.

Las condiciones de explotación de un sondeo (cota de aspiración, tipo de instalación, caudal de bombeo, ...), se definen en función de los ensayos de producción (aforos) que se realizan al finalizar la obra. También es importante reseñar que de ese caudal disponible en origen dependen las inversiones que el propietario/usuario del sondeo realizará (infraestructura de riego, por ejemplo).

Sin embargo en la mayoría de los casos, antes o después, se detectará una disminución de rendimiento de la obra que se traducirá en una disminución del caudal, descenso del nivel dinámico, incremento de los arrastres en el bombeo, etc. Estos síntomas en general se presentarán de forma progresiva aunque, como se indicará más adelante, también podrán hacerlo bruscamente.

Antes de entrar en la descripción de los sistemas de detección/diagnóstico, vamos a hacer un primer avance sobre las principales causas de las pérdidas de rendimiento de los sondeos. En principio podemos hablar de tres tipos de problemas, aunque pueden solaparse en muchos casos: los hidrogeológicos, los derivados de los procesos de incrustación y los de corrosión de las tuberías y filtros.

El primer grupo, el más obvio, son los problemas derivados de la "sobreexplotación" de las formaciones acuíferas en las que está el sondeo. Sin entrar en discusiones más técnicas podemos hablar de "sobreexplotación" de un recurso renovable, como es el agua subterránea, cuando la explotación de un sistema supera a su capacidad de renovación/recuperación. Así, en general el efecto más directo de la sobreexplotación de un acuífero o sistema de acuíferos es el descenso de su nivel piezométrico, y el agotamiento progresivo de sus recursos. La consecución de un equilibrio tendrá que pasar por el análisis detallado de los balances del sistema, y la planificación de su explotación.

Aquí nos vamos a centrar sobre los otros dos tipos de problemas de deterioro de los sondeos: los derivados de los procesos de incrustación en las tuberías, filtros, engravillado y formaciones acuíferas, y los causados por la corrosión. Si bien corrosión e incrustación tienen su causa en procesos físico-químicos relativamente diferenciados, es bastante frecuente que aparezcan asociados.

La interacción entre el medio (formaciones geológicas, agua subterránea), los materiales del sondeo (tuberías y filtros), y las variaciones del régimen natural de flujos, provocan una serie de procesos físico-químicos (frecuentemente con intervención biológica), que pueden dar lugar a **precipitación** de distintos compuestos químicos más o menos incrustantes. Esta precipitación tiene lugar especialmente en los filtros y tuberías del sondeo, aunque también en el filtro de grava y en la propia formación acuífera en el entorno del sondeo.

El efecto es una pérdida efectiva tanto del área abierta de paso de los filtros, como de la porosidad eficaz del filtro de grava y del acuífero, que se traducirá en un incremento de las pérdidas de carga del sondeo y en consecuencia una disminución de su rendimiento.



Fig. 10.1. Detalle de tramo de rejilla de sondeo prácticamente colmatado por precipitados incrustantes (foto TRAGSATEC).



Fig. 10.2. Tramo de tubería de chapa extraída de un sondeo de unos 15 años, en la que se aprecia el alto grado de incrustación (foto J. Martínez).

En cuanto a la **corrosión**, engloba todos aquellos procesos químicos, electroquímicos, físicos y biológicos susceptibles de provocar un ataque, con pérdida de material, a las tuberías y filtros de un sondeo. Las manifestaciones más frecuentes de la corrosión son el debilitamiento de las paredes del sondeo, con el consiguiente incremento del riesgo de roturas y colapsos, y la disminución de la capacidad de los filtros de retener partículas evidenciada en los arrastres que provocan excesivo desgaste y averías en los grupos de bombeo.

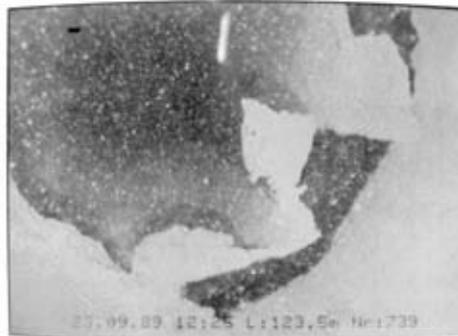


Fig. 10.3. Tubería de sondeo afectada por procesos de corrosión (foto TRAGSATEC).

Descritos de forma general los síntomas más habituales de envejecimiento de los sondeos, queda claro que el control y vigilancia de la evolución de los rendimientos de los sondeos es la base de la sistemática de detección y diagnóstico de sus problemas. El conocimiento de la química del agua, la litología de las formaciones atravesadas, la naturaleza de las tuberías y filtros, y las condiciones de explotación, aportarán también importantes datos con los que avanzar en el diagnóstico de los problemas del sondeo, y programar su regeneración.

3.- INSPECCIÓN DE SONDEOS CON VIDEO-TELEVISIÓN.

El desarrollo tecnológico de los equipos de video-televisión en los últimos años ha facilitado nuevas y poderosas herramientas para la investigación en los campos más diversos. Así, existen actualmente equipos diseñados y construidos para acceder a los más adversos entornos, trabajando a altas presiones o temperaturas, o en medios extremadamente agresivos.

Las primeras experiencias de aplicación de sistemas de televisión para la inspección de perforaciones se realizaron en sondeos de exploración de hidrocarburos. Actualmente es una técnica bastante introducida en países como Alemania, Francia e Inglaterra, paralelamente al desarrollo de las técnicas de regeneración de sondeos de agua.

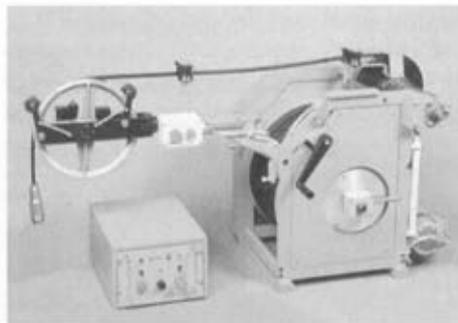


Fig. 10.4. Equipo portátil para inspección con televisión de sondeos de poca profundidad.

Aunque existen equipos portátiles de prestaciones generalmente reducidas, la mayor parte de los equipos van instalados sobre vehículos tipo furgón, con el habitáculo dividido en dos sectores: uno que aloja los elementos mecánicos (carrete-cabrestante, trípode, accesorios, etc; y otro acondicionado para el manejo, control y observación de las operaciones.

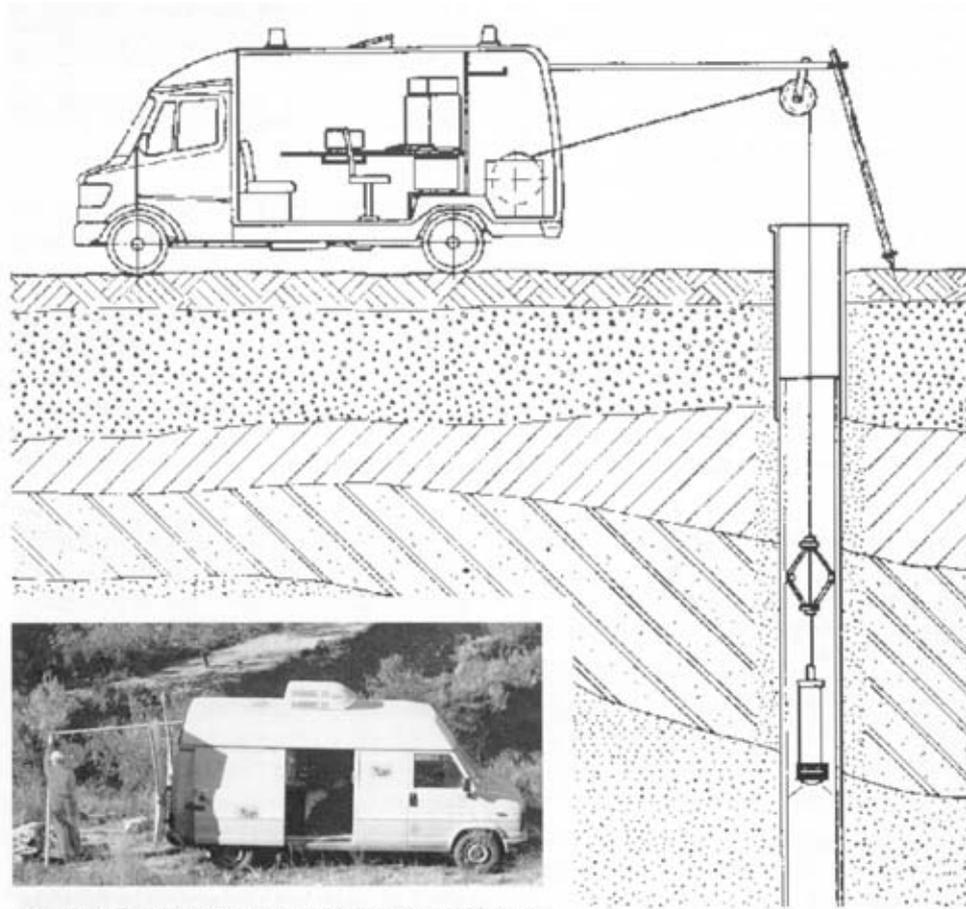


Fig. 10.5. Equipo de gran capacidad (hasta 1000 m de profundidad) para inspección con televisión de sondeos, montado sobre vehículo (foto J. Martínez).

Fig. 10.6. Croquis de equipo completo para inspección televisada de sondeos.

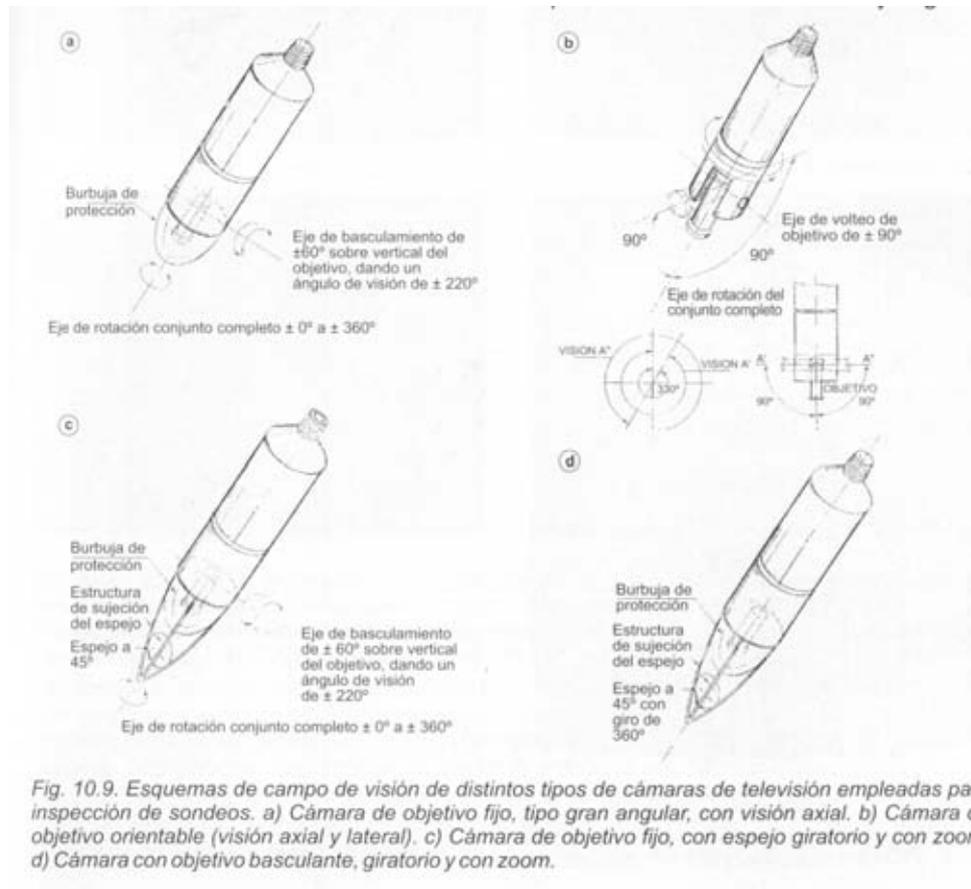


Fig. 10.7. Cámara de televisión con capacidad de trabajo de hasta 100 bar (1000 m de columna de agua) de IBAK (foto J. Martínez).



Fig. 10.8. Unidad de control y manejo de un equipo de inspección de sondeos con televisión (foto J. Martínez).

Resistencia y estanqueidad a altas presiones, calidad de imagen y campo visual son quizá los principales parámetros que marcan las diferencias entre los tipos de cámara. Respecto al primero de los parámetros, las cámaras deben estar protegidas de forma que puedan trabajar sumergidas a considerable profundidad. Para ello se introduce el equipo video dentro de un cilindro estanco de acero inoxidable, con un protector del objetivo en material plástico de gran resistencia.



En cuanto a la calidad de visión, el avance en el campo de la electrónica aplicada a los sistemas de video-color es tal que han quedado para el recuerdo los antiguos sistemas en blanco y negro. Otra dificultad existente en los primeros equipos referente al deterioro de la señal de vídeo en el cable transmisor ha quedado totalmente resuelta mediante amplificadores de señal y, más recientemente, por los sistemas de fibra óptica.

Aunque prácticamente todos los equipos modernos utilizan visión en color, algunos profesionales consideran que en determinadas ocasiones es interesante disponer de cámaras en blanco y negro.

Donde más marcadas están las diferencias de diseño y prestaciones de las cámaras es en el campo de visión. Las primeras cámaras desarrolladas poseían un objetivo fijo, de tipo gran angular, con la limitación lógica de la deformación de las imágenes en los bordes del campo visual. Hoy en día existen distintos diseños que permiten la orientación variable del objetivo e incluso la posibilidad de ampliación de imagen mediante dispositivos de zoom.

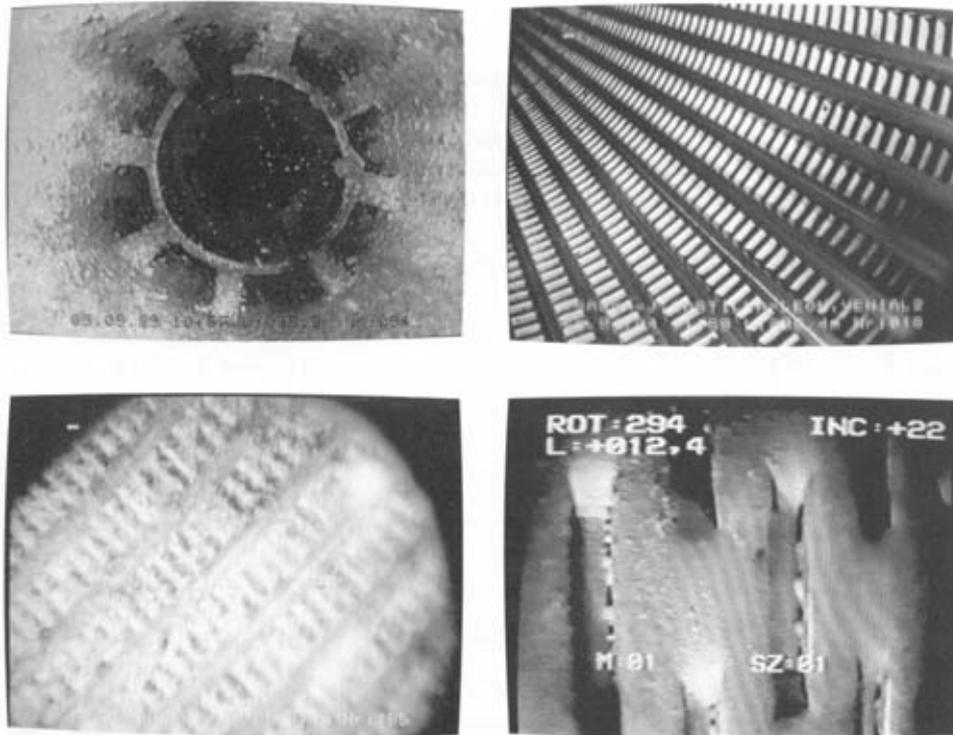


Fig. 10.10. Ejemplos de fotografías tomadas con los distintos tipos de cámaras de televisión empleadas para inspección de sondeos. a) Cámara de objetivo fijo, tipo gran angular, con visión axial. b) Cámara de objetivo orientable (visión axial y lateral). c) Cámara de objetivo fijo, con espejo giratorio y con zoom. d) Cámara con objetivo basculante, giratorio y con zoom. (Fotos archivo TRAGSATEC).

Otro parámetro importante es la precisión en la indicación de la profundidad. Los equipos suelen contar con un doble dispositivo, electrónico y mecánico, de control de profundidad, con indicación exterior en la polea e interior en pantalla de TV.

En la mayor parte de los casos hay que tener en cuenta los desfases, de rango decimétrico, debidos al coeficiente de alargamiento del cable, con valores en torno al 0.1%.

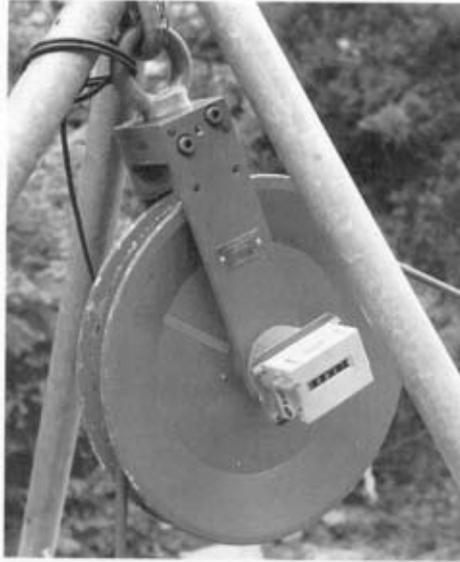


Fig. 10.11. Contador mecánico-electrónico de la profundidad de la cámara de televisión (foto J. Martínez).

Entre los campos de aplicación de los equipos de inspección televisada de sondeos, se destacan los siguientes:

- **Control de calidad:** La comprobación de la correcta construcción de un sondeo no ha sido posible hasta la disponibilidad de esta herramienta. Actualmente algunos organismos de las administraciones incluyen en los Pliegos Técnicos de los proyectos de sondeos la realización de una inspección del sondeo con video-TV para constatar su correcta construcción (ver Capítulo 13). Y no se trata tan sólo de detectar posibles defectos "físicos" como una soldadura mal realizada, una abolladura o un objeto caído en el sondeo, sino de otras incidencias que puedan influir de forma determinante en el correcto rendimiento del sondeo: desfases en la posición de los tramos de filtro respecto al ordenado, insuficiente desarrollo, etc.

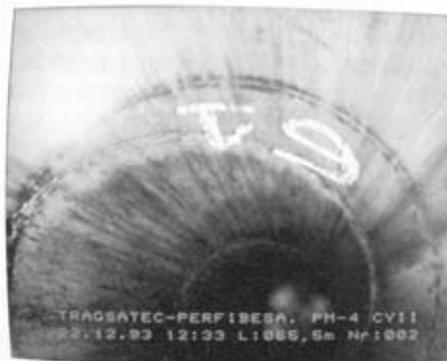


Fig. 10.12. Control final de la columna de entubación del sondeo mediante inspección con televisión. Se aprecia la numeración interna de los tramos de tubería (foto TRAGSATEC).

Así por ejemplo la realización de las recepciones de sondeos con registro óptico de los mismos, es una práctica bastante habitual en países como Francia y Alemania. En ocasiones se complementa incluso con otros ensayos como testificaciones geofísicas, ensayos de verticalidad, registros continuos con micromolinete, etc.

El registro óptico de un sondeo recién construido constituye por otra parte un interesante documento a adjuntar al informe final del mismo, que podrá servir en el futuro para controlar su evolución.

- Reconocimiento de sondeos antiguos: La inspección con televisión de sondeos antiguos de los que no se dispone de datos constructivos, o se desconoce su estado, es otra aplicación evidente de esta técnica. Aunque para llegar a un conocimiento más completo serán necesarios además otros trabajos como ensayos de bombeo y testificaciones geofísicas, con el reconocimiento con televisión se obtendrá una primera visión de las características y estado del sondeo.

- Trabajos de rehabilitación/regeneración: El estudio visual, mediante cámara de televisión, de los depósitos incrustantes permitirá llegar a un primer diagnóstico sobre el desarrollo y composición de los mismos, ayudando en consecuencia a planificar los trabajos de regeneración. El reconocimiento posterior permitirá comprobar la eficacia de los trabajos. En cualquier caso, se insiste en que la inspección con video-TV no es suficiente para evaluar la importancia de los procesos incrustantes, ni la eficacia de los trabajos de regeneración, puesto que sólo se visualiza la parte interior de los filtros.

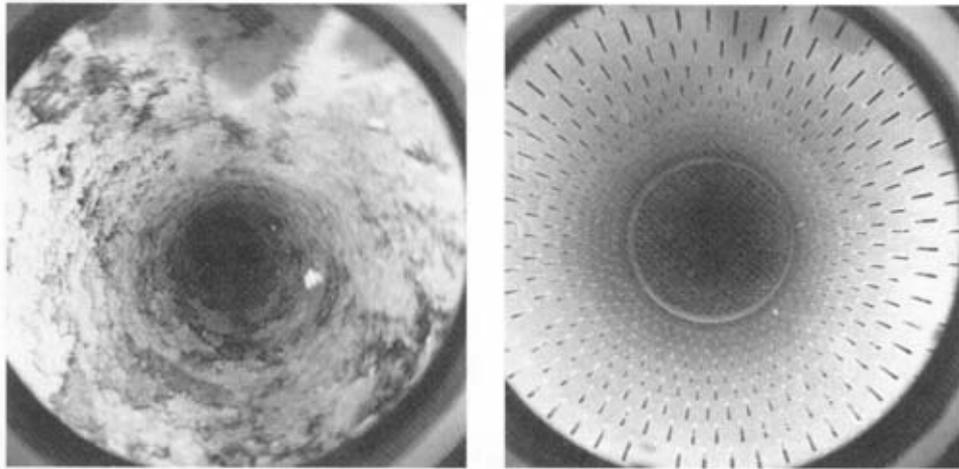


Fig. 10.13 y 10.13 bis. Fotografías de un mismo tramo de filtro antes y después de su regeneración.

La realización de otras pruebas -ensayos de bombeo esencialmente- previas y posteriores a la regeneración, permitirán cuantificar la recuperación del rendimiento del sondeo.

Del mismo modo, la identificación de la naturaleza química de los compuestos incrustantes, vital para la definición del medio regenerador a emplear, no debe encomendarse exclusivamente a los criterios visuales. La obtención de muestras de incrustaciones sólidas para su análisis no siempre es técnicamente posible, pero puede llegarse a una aproximación bastante fiable con el estudio hidrogeoquímico del agua del sondeo.

En los casos en que se sospeche que existe una fuerte incidencia de los procesos de corrosión de la chapa de la tubería, el reconocimiento con televisión permitirá detectar y evaluar los sectores más afectados, y proyectar así las operaciones correctoras.

- Servicio de apoyo en operaciones de construcción, pescas, instalación, ... de sondeos: La posibilidad del acceso visual al interior de la perforación o de su revestimiento, resulta de evidente utilidad tanto para constructores como para instaladores y usuarios. Las operaciones de pesca de herramientas, bombas, ...

caídas en el sondeo, suponen una auténtica "pesadilla" para las empresas perforadoras, por el perjuicio económico directo y el riesgo que generalmente conllevan para la obra, e incluso para los propios operarios. Los métodos tradicionales utilizados (reconocimiento con moldes esencialmente), no son comparables a la posibilidad de visualizar en directo el problema concreto. Del mismo modo pueden localizarse y corregirse defectos constructivos (abolladuras, soldaduras defectuosas, ...) que supongan un problema a la hora de instalar un grupo de bombeo en el sondeo. Por otra parte, en sondeos de los que no se dispone de datos, o estos son poco fiables, antes de proceder a su puesta en explotación es conveniente realizar al menos la inspección con video-TV para conocer su estado y seleccionar la cota de aspiración de la bomba.



Fig. 10.14. Vista superior del extremo de una herramienta de perforación (trépano) caído en el sondeo (foto TRAGSATEC).



Fig. 10.15. Obstrucción de sondeo por madejas de cables y otros objetos (foto TRAGSATEC).

- **Otros usos:** Otras aplicaciones menos obvias de estos equipos son los estudios directos de las formaciones perforadas. Aunque el riesgo que supone operar con las cámaras de video en sondeos sin revestir supone una limitación a la hora de este tipo de estudios, pueden realizarse estudios de fisuración, carstificación o simplemente reconocimientos geológicos, con obtención de interesantes resultados.

3.- PROCESOS DE INCRUSTACIÓN: TIPOS, ORIGEN Y EFECTOS.

Los orígenes de los procesos de incrustación y obstrucción de los sondeos son consecuencia de:

- **Procesos químicos:** Aquellos que provocan la precipitación de distintos compuestos químicos, siendo los más frecuentes los carbonatos o sulfatos de calcio o magnesio, y óxidos-hidróxidos de hierro y manganeso.
- **Procesos biológicos:** Caracterizados por la formación de lodos bacterianos, producidos esencialmente por bacterias ferruginosas.
- **Procesos físico-mecánicos:** En este grupo incluimos los casos de colmatación por acumulación en el filtro de grava o acuífero de restos de los lodos de perforación no desalojados durante las operaciones de limpieza y desarrollo.
- **Procesos físico-químicos:** Es el caso de colmatación por formación de geles, emulsiones o "sludges", al contactar los lodos y compuestos hidrocarburos. También los efectos del lodo sobre determinadas formaciones arcillosas del terreno.

Las formas más habituales en que se presentan los precipitados son: costras duras pero quebradizas, y masas gelatinosas.

3.1.- COLMATACIÓN POR PROCESOS QUÍMICOS.

La química del agua de un acuífero queda definida esencialmente por la composición de las formaciones geológicas que ha atravesado durante su ciclo subterráneo. Así, cualquier modificación en los parámetros que rigen sus condiciones de equilibrio físico-químico, tendrá efectos directos en los productos de solubilidad de los distintos elementos presentes en el agua. En definitiva aumentará o disminuirá la capacidad del agua de mantener determinadas concentraciones de solutos, produciéndose en consecuencia fenómenos de disolución o precipitación.

Por ejemplo, las aguas subterráneas a lo largo de su infiltración pueden disolver gran cantidad de carbonatos gracias al elevado contenido en CO_2 de los terrenos no saturados (hasta 20 veces más que en la atmósfera). Así, la disminución de la presión hidrostática debida al abatimiento del nivel por bombeo facilitará la liberación de CO_2 , desplazando el equilibrio de los bicarbonatos disueltos precipitando así el exceso de carbonatos, en forma esencialmente de CO_3Ca (el CO_3Mg es más soluble).

Las variaciones de temperatura también pueden provocar variaciones en el equilibrio químico, y dar lugar a precipitados carbonatados incrustantes (como ocurre en conducciones, con cierta frecuencia).

El otro tipo de incrustaciones de origen químico más habitual son los compuestos oxidados de hierro y manganeso. Es bastante frecuente que las aguas subterráneas, sobre todo en ambientes geoquímicos reductores, presenten elevados contenidos en hierro. Por procesos de oxidación en los sondeos los compuestos ferrosos o de manganeso, precipitan como hidróxidos y óxidos. El hidróxido férrico aparece como un lodo negrozco, mientras que el óxido es de color marrón-rojizo. El óxido de manganeso forma una sustancia negro-mate, muy insoluble.



Fig. 10.19. Tuberías de impulsión de equipo de bombeo con alto grado de desarrollo de incrustaciones de hierro y manganeso (foto J. Martínez).

Bastante menos frecuentes son las incrustaciones sulfatadas, pues su solubilidad es muy elevada, y más escasas aún las silíceas (aunque a veces quedan atrapadas partículas silíceas en incrustaciones de otra composición).

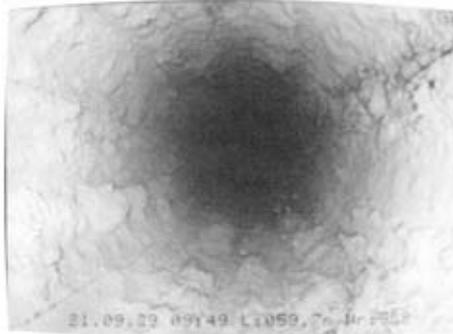


Fig. 10.17. Sondeo con incrustaciones de carbonatos en sus tuberías y filtros (foto TRAGSATEC).

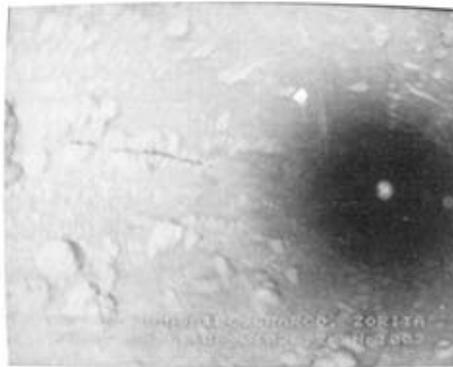


Fig. 10.18. Incrustaciones de óxidos-hidróxidos de hierro en sondeo entubado con chapa de acero al carbono (foto TRAGSATEC).

3.2.- COLMATACIÓN POR PROCESOS BIOLÓGICOS.

Determinadas bacterias tienen capacidad de precipitar, mediante reacciones de su propio metabolismo (catalización enzimática), los compuestos ferrosos en férricos. Este efecto también puede darse en el caso del manganeso.

Esta precipitación se manifiesta en forma de "tubérculos" característicos, y de lodos o cienos mucilaginosos (de hidróxidos férricos hidratados, esencialmente) que pueden llegar a obstruir los filtros de los sondeos. Estos procesos pueden ser bastante rápidos, y afectar también a las formaciones acuíferas en el entorno del sondeo.

Otros precipitados muy frecuentes en las tuberías de los sondeos son un tapizado pulverulento de color negruzco, cuya génesis parece ligada a la presencia de bacterias anaerobias que reducen los sulfatos, precipitando como sulfuros de hierro.

Estos tipos de bacterias aparecen en sondeos poco profundos, en aguas frías (temperaturas inferiores a 20° C), en aguas ricas en hierro y manganeso (más de 1 mg/l), o en aguas con muy débil tasa de sales disueltas (residuo seco menor de 1000 mg/l).

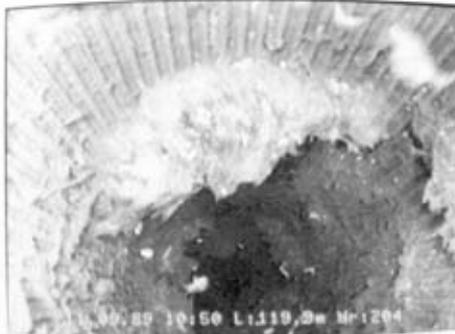


Fig. 10.20. Aspecto de tramo de filtro de ranura continua en acero inoxidable, prácticamente colmatado por crecimientos de origen bacteriano (foto TRAGSATEC).



Fig. 10.21. Detalle de la fotografía anterior (foto TRAGSATEC).

Los diferentes tipos de bacterias pueden ser identificados al microscopio, presentándose a continuación un cuadro resumen de los grupos más frecuentes:

Grupo	Descripción	Croquis
<i>Siderocapsa</i>	Compuesto por células cocoides aglutinadas dentro de una cápsula común. En la superficie de las cápsulas se identifican los precipitados férricos.	
<i>Gallionella</i>	Bacterias de tipo peduncular. Los depósitos de hidróxido férrico aparecen en el extremo de las estructuras en forma de vainas encadenadas que segregan las bacterias. Estas bacterias pedunculadas pueden desprenderse de sus soportes, dando lugar a formaciones filamentosas en suspensión. Este tipo de colonias bacterianas se caracterizan por su rápida proliferación, y son las responsables de una gran parte de los casos de colmatación orgánica de los filtros de los sondeos. Aunque su hábitat característico suele estar entre 30 y 120 m de profundidad, puede encontrarse hasta los 200 m. Sobreviven en medio con débil contenido en oxígeno, siendo la temperatura óptima para su desarrollo entre 0 y 10 EC.	
<i>Crenothryx</i>	Son bacterias filamentosas. El primer tipo está compuesto por varias filas de células bacterianas, incrustadas de hierro y manganeso. En su interior contienen esporas que pueden germinar y formar nuevos filamentos.	
<i>Clonothryx</i>	El segundo tipo se caracteriza por ser incoloras y cilíndricas. Están constituidas por cadenas orgánicas impregnadas de óxidos de hierro o manganeso.	
<i>Leptothryx</i> <i>Sphaerotilus</i>	Tienen cadenas impregnadas en óxidos de hierro y manganeso. Se dividen transversalmente, siendo móviles gracias a manojos de flagelos.	

Tabla XXVIII. Principales tipos de bacterias presentes en las aguas subterráneas.

3.3.- COLMATACIÓN POR PROCESOS MECÁNICOS.

Los arrastres de materiales de granulometrías finas (arcillas, limos, arenas finas), pueden provocar una colmatación progresiva de los filtros, macizo de grava, e incluso de las propias formaciones acuífera.

3.4.- COLMATACIÓN POR PROCESOS FÍSICO-QUÍMICOS.

Durante las operaciones de perforación, desarrollo y operaciones auxiliares (cementaciones por ejemplo), pueden introducirse en las formaciones acuíferas una serie de fluidos primarios y secundarios. En el contacto de dichos fluidos con las formaciones geológicas pueden producirse fenómenos, como es el caso de hinchamiento de arcillas, que provoquen efectos de colmatación por pérdida de permeabilidad en el entorno del sondeo.

4.- PREVENCIÓN DEL "ENVEJECIMIENTO" DE LOS SONDEOS.

Como se ha indicado repetidas veces, la adecuación del diseño de la captación es esencial para la optimización de su rendimiento. Así, también lo es para la prevención, o al menos retardo, del desarrollo de los procesos que determinan el "envejecimiento" de las captaciones.

Entre los factores más importantes a tener en cuenta en la prevención de estos procesos, caben destacar los siguientes:

- Selección de los materiales de revestimiento del sondeo: Las tuberías, y especialmente los filtros, con que se acondicione al sondeo deberán seleccionarse teniendo en cuenta los parámetros físico-químicos del agua (composición, temperatura, agresividad), la estructura y textura de las formaciones perforadas (granulometría, presencia de arcillas hinchables), la velocidad de entrada del agua, etc.

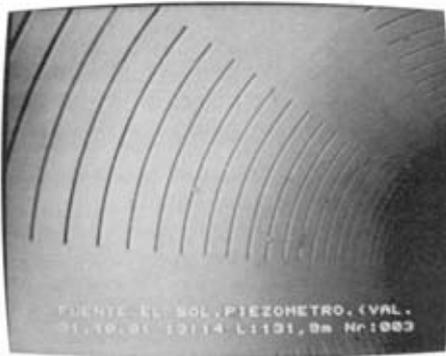


Fig. 10.23. Sondeo entubado con tubería de PVC, libre de incrustaciones (foto TRAGSATEC).

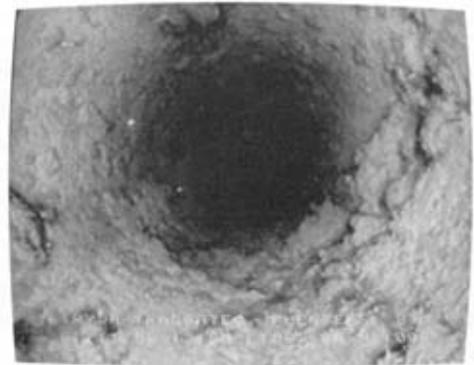


Fig. 10.24. Sondeo entubado con chapa de acero al carbono, de la misma edad y situado a escasa distancia del de la anterior fotografía, con importante desarrollo de incrustaciones (foto TRAGSATEC).

- Construcción y desarrollo del sondeo: Aún sin entrar en discusiones sobre sistemas de perforación, es evidente que una correcta construcción del sondeo revertirá en una mejora del aprovechamiento de los acuíferos. En este aspecto tiene especial importancia el capítulo de limpieza y desarrollo, pues al mejorar la permeabilidad en los propios filtros, el engravillado y las formaciones acuíferas, se conseguirá minimizar las pérdidas de carga y lograr velocidades de circulación del agua más bajas.

- Condiciones de explotación: La selección del régimen de explotación adaptado a las características de los acuíferos y al propio diseño del sondeo, es importante para la prevención de los procesos de deterioro del mismo. Así por ejemplo, deben evitarse los fuertes bombeos con descensos importantes, seguidos de largos periodos de parada, pues se favorece el desarrollo de las incrustaciones.

En este aspecto es interesante lógicamente la distribución de la extracción del caudal de agua necesario de varios puntos.

5.- REGENERACIÓN DE SONDEOS: TÉCNICAS, REACTIVOS Y DISPOSITIVOS ESPECIALES.

En este apartado nos vamos a referir a la tecnología desarrollada hasta la actualidad con vistas a la eliminación de las incrustaciones.

No vamos a entrar en otro tipo de operaciones de "rehabilitación" o "reparación" de los sondeos, cuando existen problemas físicos derivados de una incorrecta construcción (cementaciones incorrectas, desfases en la posición de filtros, columnas descentradas, soldaduras defectuosas, etc), o de averías posteriores (caída de objetos al sondeo, colapsos de tubería, rotura de filtros, etc).

En principio podemos hacer una separación entre regeneración "físico-mecánica", y regeneración "química", aunque como se verá los sistemas más completos son una combinación de ambos efectos.

Antes de entrar en la descripción de las técnicas y productos "regeneradores", es importante mencionar que la elección de los mismos y del sistema de regeneración del sondeo deberá tener en cuenta dos grupos de factores esenciales: la causa, textura y composición de los precipitados, y el tipo y composición de las tuberías y filtros.

Respecto a la composición de las incrustaciones, ésta suele interpretarse indirectamente a través de la analítica del agua. Sin embargo, siempre que sea posible, deberán analizarse las propias incrustaciones.



Fig. 10.25. Toma de muestras de incrustaciones de tubería de impulsión del grupo de bombeo instalado en el sondeo (foto J. Martínez).

Es práctica habitual tomar las muestras de las tuberías de impulsión o de la bomba. Sin embargo estas muestras pueden no ser representativas por varias causas: distinta composición de las tuberías de impulsión y del sondeo, distinto tiempo de exposición, etc. Además, como se observa frecuentemente al realizar inspecciones con televisión, pueden existir variaciones del tipo de incrustaciones a lo largo del sondeo, por debajo incluso de la cota de aspiración de la bomba.

Actualmente existen dispositivos específicos que permiten tomar muestras de incrustaciones directamente del interior de la entubación del sondeo. Algunos de ellos, como el desarrollado por

TRAGSATEC, van acoplados a la propia cámara de televisión, con lo que pueden tomarse las muestras durante la propia inspección.



Fig. 10.26. Dispositivo electromecánico para toma de muestras de incrustaciones del interior de las tuberías y filtros de sondeos. Este dispositivo, diseñado por TRAGSATEC, va adaptado a la cámara de televisión (foto J. Martínez).

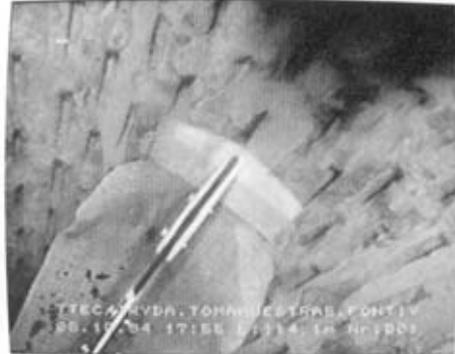
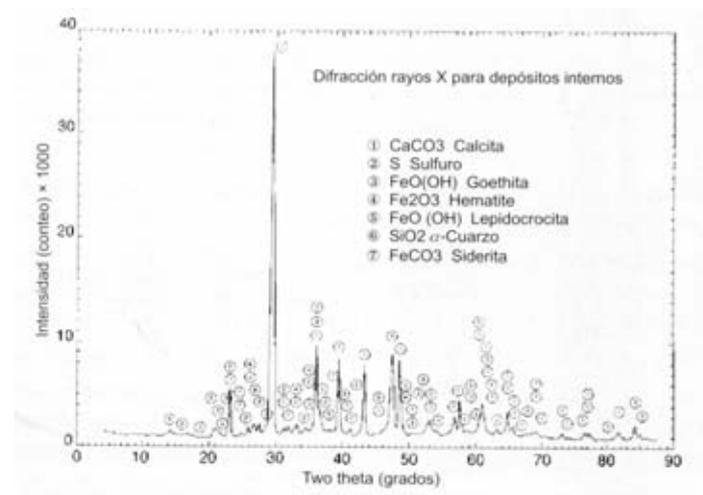


Fig. 10.27. Toma de muestras de incrustaciones en sondeo con el equipo de la fotografía anterior (foto TRAGSATEC).

Respecto a la analítica, y sin entrar en muchos detalles, existen varias técnicas aplicables al estudio de las incrustaciones. De ellas, la difracción por rayos X es la más utilizada para la determinación de las especies minerales presentes. Si se sospecha del origen biológico de las incrustaciones, podrán utilizarse las técnicas de analítica microbiológica (cultivos).



En todo caso deberán seguirse las instrucciones que los laboratorios indiquen sobre la manipulación, almacenamiento y transporte de las muestras. Suele ser recomendable guardar las mismas en recipientes adecuados, rellenos del propio agua del sondeo.

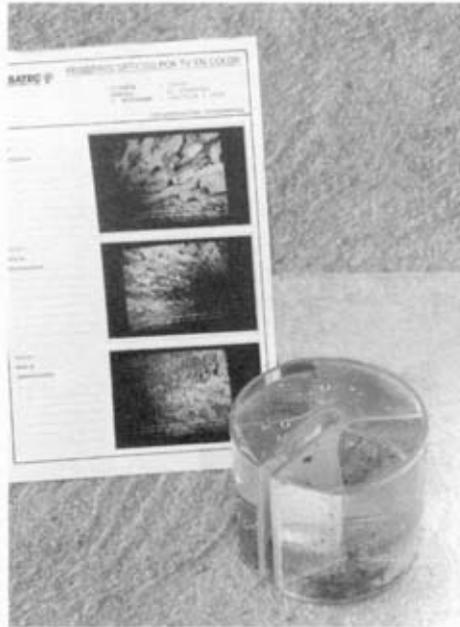


Fig. 10.29. Recipiente del dispositivo para toma de muestras de incrustaciones. Este dispositivo se abre al accionarse el tomamuestras, recogiendo agua y muestra sólida (foto J. Martínez).

Respecto a la textura, las observaciones a través de los sistemas de inspección con video-televisión permiten generalmente una suficiente apreciación sobre las características de las incrustaciones. Más interesante será obviamente la observación directa (o con lupa binocular) de las muestras.

5.1.- REGENERACIÓN "FÍSICO-MECÁNICA".

En términos generales se incluyen en este apartado todos los sistemas que tratan de mejorar las condiciones de permeabilidad en el sondeo y su entorno eliminando, en este caso, los precipitados y depósitos incrustantes.

Con esta definición genérica ya podemos imaginar que las técnicas de regeneración físico-mecánica se corresponden, en su mayoría, con las de desarrollo de sondeos.

La validez de estos métodos dependerá de su capacidad de limpiar no solo el interior de la columna de entubación sino también el engravillado y la formación acuífera, donde, como ya hemos explicado, también se produce el efecto de colmatación.

A continuación se indican algunas de las técnicas y dispositivos más usuales, que suelen combinarse para mayor eficacia.

* Cepillado: Consiste en la limpieza del interior de las tuberías y filtros mediante un dispositivo con uno o varios anillos de cepillo, que se desplaza en movimiento de vaivén y/o rotativo en el sondeo. Según el tipo de incrustación, y también el material de las tuberías, se emplearán cerdas de PVC o metálicas más o menos abrasivas.

Las ventajas del sistema son evidentes en cuanto que se trata de una operación sencilla, barata y de bajo riesgo. Por contrapartida su eficacia se limita a la cara interna de la entubación (aunque siempre habrá un cierto efecto de pistoneo).

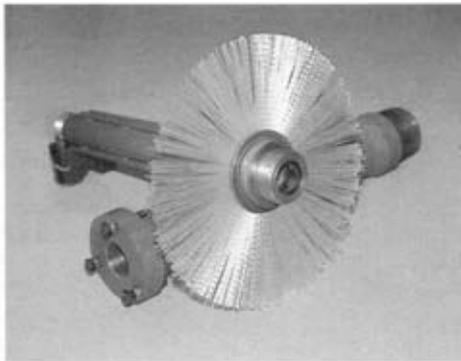


Fig. 10.30. Equipo para cepillado de sondeos (foto J. Martínez).



Fig. 10.31. Equipo combinado para cepillado y pistoneo de sondeos (foto J. Martínez).

- **Pistoneo:** Existen varios tipos de dispositivos para lograr el efecto de pistoneo del sondeo. En definitiva se trata de forzar una circulación de doble flujo alternante en el sondeo, con vistas a movilizar y arrastrar las partículas finas y mejorar la transmisibilidad del medio.

En su aplicación a la regeneración continúa siendo un dispositivo sencillo y de relativo bajo coste, aunque con considerable riesgo. Un pistoneo excesivamente vigoroso en un sondeo muy colmatado puede ocasionar problemas como colapsos de la columna de entubación, entrada de grava al sondeo, ... Este riesgo es aún mayor si existen procesos de corrosión. De aquí que el pistoneo deba planificarse de una forma muy progresiva y con estricto control del mismo. En cuanto a su eficacia puede ser suficiente para la eliminación de depósitos poco incrustantes, siendo su penetración bastante limitada.

- **Inyección a alta presión:** La inyección de agua o aire a alta presión mediante dispositivos tipo "jet" en los filtros del sondeo, puede lograr un cierto desalojo de los depósitos incrustantes, aunque también con penetración limitada. El coste suele ser algo mayor que el de las operaciones anteriores pues se precisa de compresores o bombas de alta presión. En cuanto a riesgos, no suele ser problemático salvo en casos de importante debilitamiento de los filtros por fenómenos de corrosión.

Una variante de este sistema es la inyección de aire a alta presión, mediante un fino varillaje, en el propio engravillado del sondeo. Esta operación, que en muchos casos no es posible técnicamente, conlleva una complejidad y riesgo considerable, y su eficacia es bastante discutible.

- **Bombeos y sobrebombeos:** Igual que en el caso de los desarrollos, el efecto de depresiones fuertes en el sondeo, combinado en muchos casos con reversión del sentido de flujo en las paradas del bombeo, provoca un efecto similar al del pistoneo pero bastante más importante y penetrativo.

Por las mismas razones, se multiplica el riesgo de problemas de colapsos o entrada de grava al sondeo, sobre todo en sondeos muy deteriorados.

El bombeo puede realizarse bien mediante grupos de bombeo o por dispositivos de "air lift".

- Dispositivos de obturadores: En este grupo incluimos las técnicas basadas en dispositivos dotados de sistemas de obturación parcial o total, que permiten el tratamiento del sondeo filtro a filtro, incrementando así su eficacia.

Los dispositivos más sencillos se asemejan a un doble pistón de gomas, adaptado a una varilla hueca. Entre los dos anillos de gomas (de diámetro adaptado al de la tubería) se aísla cada tramo a tratar, inyectándose agua a presión o bombeando. Estos dispositivos, de construcción y manejo relativamente sencillos, permiten una acción más focalizada en cada tramo filtrante. Sin embargo, al no ser el cierre perfectamente estanco, su eficacia es limitada.

Lógica evolución de este sistema son los obturadores estancos, en que los discos de goma se sustituyen por balones hinchables a presión, con gases o líquidos. La eficacia de estos dispositivos es claramente superior, permitiendo además el estudio y evaluación individualizado de cada tramo acuífero. Por contra, se trata de equipos caros y de manejo complejo, sobre todo a grandes profundidades, y no debe realizarse sin un especialista a pie de obra.



Fig. 10.32. Equipo de doble obturación estanca (doble packer) para desarrollo/regeneración de sondeos. (Cortesía de Preussag).



Fig. 10.33. Regeneración de sondeos mediante inyección y bombeo filtro a filtro, empleando un dispositivo de doble packer (foto J. Martínez).

Dado que, como ya se ha indicado, los tratamientos regenerativos de los sondeos suelen ser mixtos físico-químicos, al final del apartado de regeneración química describiremos algunos equipos específicamente desarrollados para estos trabajos.

5.2.- REGENERACIÓN "QUÍMICA".

Dado que los procesos de incrustación tienen su causa esencial en las modificaciones de los equilibrios químicos naturales del sistema aire-agua-formaciones geológicas, es evidente que nuevas intervenciones en el sistema podrán conducir a una reversión del proceso, con disolución de los precipitados.

Como ya se han explicado los procesos químicos, con sus componentes físicos y biológicos, responsables del desarrollo de incrustaciones, vamos a revisar los principales productos químicos utilizados para regeneración. También incluiremos a continuación una relación de algunos productos comerciales específicos, combinación de los principales reactivos con otros compuestos como inhibidores, estabilizadores y retardadores.

El **ácido clorhídrico** (ClH), también conocido por ácido muriático, es el compuesto más comunmente utilizado tanto para el desarrollo como para la regeneración de sondeos.

En cuanto a aplicaciones, el ClH está especialmente indicado para la disolución de las incrustaciones de composición carbonatada. En el caso de incrustaciones de compuestos oxidados de hierro y manganeso, hay que tener en cuenta que a pH superiores a 3 puede producirse un precipitado de muy difícil eliminación.

El ClH no debe utilizarse en tuberías galvanizadas, pues ataca el Zn. Es aconsejable emplearlo con inhibidores de corrosión (suele emplearse cítrico, fosfórico o tartárico, disueltos a razón de 0.5 a 0.75 Kg/100 l de ClH), para atenuar dicho efecto.

Comercialmente suele servirse en cisternas o garrafas (de material plástico), con concentraciones de 20° Baumé. Las dosis habituales rondan 1.25/2 veces el volumen de agua correspondiente a cada tramo de filtro a tratar. Los sistemas de tratamiento coinciden, como ya hemos señalado, con los de las acidificaciones para desarrollo de sondeos (por gravedad, inyección a baja presión, inyección con cabezal cerrado, con aire comprimido, ...), aunque para regeneración suelen emplearse concentraciones más elevadas. Recordamos que los elementos (tuberías, bombas, ...) deben ser de materiales resistentes a la corrosión (plásticos especiales, acero inoxidable).

En cuanto al manejo insistimos en la peligrosidad del mismo. El ClH puede provocar graves quemaduras, especialmente en los ojos, y debe evitarse la inhalación de sus vapores por su alta toxicidad. A efectos de prevención existen estrictas normativas de seguridad en el trabajo para tratamientos con este tipo de productos. También es importante prever la evacuación y neutralización de los residuos líquidos y sólidos, una vez finalizado el tratamiento, a fin de evitar impactos ambientales negativos.

El **ácido acético/hidroxiacético** ($\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$), o ácido glicólico, aunque menos conocido es también sumamente eficaz para la disolución de precipitaciones, especialmente las costras de Fe y Mn. Además es un agente quelante, es decir, que rodea a los iones metálicos (Fe, Ca y Mn), evitando su combinación química con otros componentes, manteniéndose así en disolución durante el tratamiento. También es un excelente bactericida, destruyendo las bacterias y disolviendo sus precipitados.

Se trata de un compuesto de manejo bastante más sencillo y menos peligroso que el ClH, siendo además menos corrosivo. Por contra sus reacciones de ataque son bastante más lentas (de hecho a veces se utiliza mezclado con el ClH, como retardador).

Comercialmente se presenta en forma líquida, con concentraciones del 70%. Los sistemas de tratamiento son similares a los empleados con el ClH, con concentraciones entre el 5 y 10%

El **ácido sulfámico** ($\text{NH}_2\text{SO}_3\text{H}$) tiene unas aplicaciones semejantes al CIH, aunque es claramente menos eficaz que este en el tratamiento de costras de Fe y Mn (aunque puede aumentarse la eficacia añadiendo ClNa). En general su eficacia es intermedia entre el clorhídrico y el acético.

Es menos corrosivo que el CIH, pero no debe utilizarse en tuberías galvanizadas. Se comercializa en sacos de granulado blanco de aspecto cristalino, no siendo necesarias precauciones especiales para su manipulación mientras está en esta forma. Una vez disuelto deben tomarse las mismas precauciones que con el CIH.

Su solubilidad es bastante sensible a la temperatura, empleándose generalmente con concentraciones del 10-15% (aunque en ocasiones se utiliza hasta el 30%). Puede introducirse directamente en el sondeo, facilitando su disolución mediante agitación, o disolverse previamente en cubas e inyectarlo con sistemas similares a los otros reactivos. Su tiempo de reacción es intermedio entre el CIH y el acético.

Es importante no confundirlo con el ácido sulfúrico, pues la utilización de éste en presencia de costras carbonato cálcico, provoca la precipitación de sulfato cálcico, muy insoluble. Además este ácido es altamente corrosivo, incluso con inhibidores.

Por último también podemos incluir en este grupo a los compuestos clorados, especialmente **hipoclorito cálcico** e **hipoclorito sódico**. Aunque la principal aplicación es la desinfección de tuberías y equipos de bombeo de los sondeos de abastecimiento antes de su puesta en explotación, también se emplean para el tratamiento de sondeos con problemas de colmatación por crecimientos bacterianos.

Previamente al tratamiento es recomendable tratar de eliminar, mediante operaciones de desarrollo y/o acidificación, las posibles sustancias que sirvan de sustrato al desarrollo de las colonias bacterianas (lodos orgánicos, hidrocarburos,...). Generalmente se utilizan concentraciones superiores a 500 ppm.

Combinado con polifosfatos mejora sustancialmente su capacidad de disolución gracias a la capacidad de estos de capturar iones de Ca, Fe y Mn, al tiempo que actúan dispersando los óxidos y sales metálicas, así como las arcillas y limos.

Deben tomarse precauciones en la manipulación de los compuestos clorados, sobre todo con las emanaciones gaseosas de cloro. A parte de los sistemas habituales de tratamiento (por gravedad, inyección, ...), también puede inyectarse desde sondeos próximos, al tiempo que se bombea desde el que se quiere regenerar.



Fig. 10.35. Bombeo de un sondeo tras su regeneración química, con neutralización de sus vertidos (foto J. Martínez).

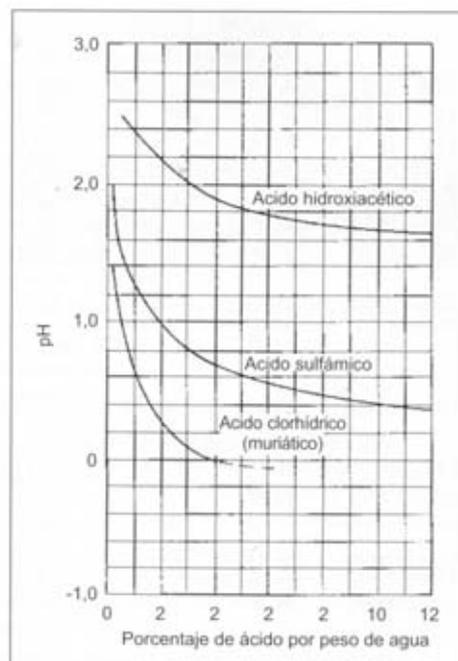


Fig. 10.36. Relaciones concentraciones/pH para los ácidos hidroxiacético, sulfámico y clorhídrico (Driscoll, 1987).

Como ya se indicó, existen en el mercado una serie de productos especialmente elaborados para su aplicación en el campo de regeneración de sondeos. En principio estos productos son combinaciones en distintas proporciones de los reactivos antes descritos, a los que se han integrado una serie de aditivos como retardadores, humectantes, estabilizantes, antioxidantes e inhibidores de corrosión.

Con estos productos se busca, además de optimizar la efectividad de la regeneración, facilitar su manejo, y minimizar los riesgos para los operadores así como el impacto ecológico. Respecto a este último punto no hay que olvidar que algunos países tienen una estricta normativa medioambiental, por lo que los productos deben estar homologados respecto a la misma.

A continuación se indican algunos de estos productos, sin indicación de su composición exacta al ser esta un "secreto" celosamente guardado por los laboratorios fabricantes.



Fig. 10.37. Preparación de regenerante, a base de ácidos orgánicos y tripolifosfatos, en depósito metálico (foto J. Martínez).

Fabricante	Denominación	Características
Preussag	<i>Wessoclean</i>	Utilizado para todo tipo de incrustaciones; potente bactericida. Biodegradable, no tóxico ni contaminante. No corrosivo. Composición: ácidos orgánicos (cítrico y ascórbico). Se utiliza en concentraciones de 8 g/l a pH 2,5-3 (calentando puede disminuirse la concentración)
Johnson	<i>Nu-Well</i>	Comprimidos de ácido sulfámico con aditivos para aumentar su densidad y capacidad humectante, e inhibidores de corrosión. Biodegradable. Se emplea en soluciones al 30%.
Johnson	<i>J.W.R.</i>	El Johnson Well Generator (JWR) es un compuesto de ácidos químicamente puros, orgánicos y minerales, con aditivos e inhibidores de corrosión. Indicado para tratamiento de precipitados e incrustaciones de todo tipo: carbonatos, óxidos de Fe y Mn. Bactericida. Dos componentes que se mezclan antes de su inyección: bidones de 25 kg de solución base + 1 kg de ácido ascórbico.
Herli France	<i>Herli-Rapid TWB (Herli-FCM1) (Herli-FCM2)</i>	El H-R TWG es una combinación de ácidos orgánicos y minerales, agentes tensoactivos, inhibidores de corrosión y aditivos bio-degradables. Indicado para todo tipo de incrustaciones, potente bactericida. Se utiliza (en forma líquida) para incrustaciones carbonatadas, y con los aditivos FCM1 (ácido ascórbico) y FCM2 para tratamiento de incrustaciones de hierro y manganeso. No corrosivo. En su manejo se tomarán precauciones elementales, especialmente con las emanaciones gaseosas. No debe mezclarse con cloro ni derivados clorados.
Herli France	<i>Herlisil</i>	Desinfectante líquido a base de peróxido de hidrógeno y plata. No clorado. No contaminante, biodegradable.
Carela	<i>Bio-Plus forte</i>	Combinación de ácidos químicamente puros, con agentes humectantes e inhibidores de corrosión. Biodegradable. Indicado para todo tipo de incrustaciones. Potente bactericida. Mezcla de dos componentes: Carela Bio forte y Carela Plus (relación 30:1). Se emplean dosis del 10-15% del volumen de agua del tramo a tratar.

Tabla XXIX. Relación y breve descripción de algunos de los productos comerciales específicos para regeneración de sondeos.

5.3.- ALGUNOS EQUIPOS ESPECÍFICOS PARA REGENERACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE SONDEOS.

Por último se relacionan a continuación algunos de los equipos más sofisticados desarrollados expresamente para estos trabajos.

En el diseño y perfeccionamiento de dichos equipos han intervenido tanto los investigadores de los procesos incrustantes, como los expertos en hidráulica, y lógicamente la propia experiencia de los operadores de regeneración.

En esencia estos dispositivos tratan de combinar la acción mecánica (cepillado, pistoneo, bombeo, etc) con el mejor aprovechamiento de los regenerantes químicos. Así, se consigue una mayor penetración del regenerante, se logra un desalojo de los productos residuales de las reacciones, y se consiguen una mayor rapidez y eficacia general de los trabajos.



Fig. 10.38. Equipos de regeneración físico-química de sondeos (foto J. Martínez).

En el cuadro que se acompaña se describen algunos de estos dispositivos:

Fabricante	Denominación	Características
Preussag	<i>Turbocleaner</i>	Equipo compuesto de doble cámara, con packers superior, medio e inferior. En cada cámara hay sendas bombas electrosumergidas, que fuerzan la circulación del agua y regenerante, bombeando e impulsando alternativamente.
Carela	<i>Carela Well-Champ</i>	Dispositivo que combina el cepillado mecánico (longitudinal+rotativo), con efecto de pistoneo e inyección a alta presión del regenerante. Se consigue así una circulación de doble sentido alternante, tanto horizontal como vertical, del regenerante.
Mecathec	<i>Kieswascher KW 3G</i>	Sistema de doble cámara, individualizadas mediante tres juegos de obturadores (packers). Entre ambas cámaras se provoca, mediante una bomba, un flujo reversible, forzando la circulación del fluido regenerante a través del filtro de grava. De esta forma se hace circular el regenerante en sentido horizontal y vertical, y con inversión periódica del sentido de flujo. La versión más reciente (3G) dispone de control continuo ("on line") de parámetros físicos (resistencia al paso del fluido) y químicos (pH, conductividad, contenido en iones de Fe, Mn, carbonatos, etc.), lo que permite optimizar los tiempos y volúmenes de regenerante a emplear en cada tramo filtrante.

Tabla XXX. Relación y breve descripción de algunos de los equipos específicos para regeneración de sondeos.

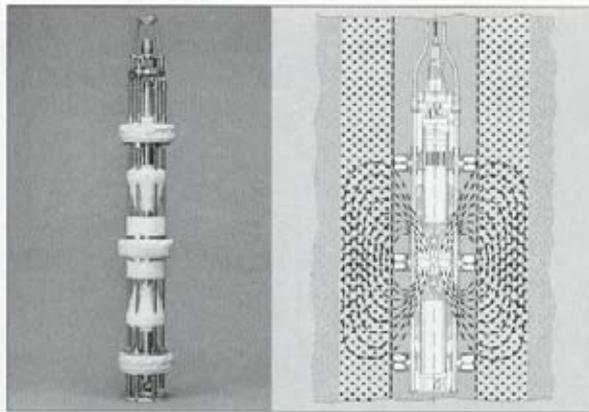


Fig. 10.39. Esquema de funcionamiento del dispositivo de regeneración Kieswascher KW 3G. (Cortesía de MECATEC).



Fig. 10.40. Detalle del dispositivo KW36 (foto J. Martínez).

6.- CORROSIÓN: DEFINICIÓN Y CAUSAS

En su obra "*Corrosión y oxidación*", WEST nos ofrece una definición, sencilla pero muy ilustrativa, del concepto de corrosión metálica como "el desgaste superficial que sucede cuando los metales se exponen a ambientes reactivos. Los compuestos metálicos que constituyen los productos de tal desgaste son parientes cercanos de las rocas minerales metalíferas que se encuentran en la corteza terrestre. En otras palabras, las reacciones de corrosión ocasionan que los metales regresen a sus menas originales".

El análisis de las causas y efectos de los fenómenos de corrosión siempre ha sido un campo de investigación común a expertos en química, metalurgia e ingeniería de obras públicas entre otros. La magnitud de los problemas causados por la corrosión metálica en obras públicas, industria, infraestructura ,... corrosión es tal que se estima que los países industrializados de occidente gastan entre el 2 y el 3% de su producto interior bruto, en la prevención y reparación de los daños causados por estos procesos. Así por ejemplo, se ha invertido mucho esfuerzo en el desarrollo de recubrimientos artificiales que aislen el metal del ambiente, o que al menos reduzcan la rapidez de los procesos corrosivos. También se han investigado

las manipulaciones del ambiente que favorezcan la formación de capas protectoras, mediante adición de agentes inhibidores de corrosión.

En el dominio de las aguas subterráneas, los fenómenos de corrosión metálica tienen especial importancia en los procesos de deterioro de sus tuberías, filtros y grupos de bombeo. El debilitamiento de las partes metálicas atacadas por corrosión llevan a una pérdida de su resistencia a las tensiones y presiones a que están sometidas, llegando a producirse roturas o colapsos que pueden inutilizar de forma definitiva la captación. Además, al provocar variaciones en los equilibrios químicos del sistema agua/metal/aire, favorecen la otra gran causa de deterioro del sondeo: las incrustaciones.

En cuanto a las causas, la corrosión de las tuberías de los sondeos puede tener origen en procesos químicos, electroquímicos, mecánicos y bacterianos, solapándose en bastantes ocasiones varias de estas causas.



Fig. 10.41. Colapso de tubería de sondeo debilitada por los fenómenos de corrosión (foto TRAGSATEC).

6.1.- CORROSIÓN QUÍMICA Y ELECTROQUÍMICA.

La corrosión química se produce en aguas ácidas, con $\text{pH} < 7$. Las causas naturales más comunes de estas aguas son: elevadas concentraciones de iones H^+ , presencia de oxígeno disuelto incluso en pequeñas cantidades, presencia de sulfídrico (H_2S), de dióxido de carbono (CO_2), de ácido clorhídrico (HCl), de cloruros, de ácido sulfúrico (H_2SO_4), o de arcillas ricas en yesos.



Fig. 10.42. Vista interior de un sondeo con la tubería parcialmente destruida por la corrosión, en aguas cloruradas (foto TRAGSATEC).



Fig. 10.43. Detalle de tubería de impulsión de grupo de bombeo de sondeo afectada por corrosión, en aguas sulfurosas (foto J. Martínez).

Pero también influyen otros factores como la velocidad de circulación del agua, la temperatura y la formación de costras carbonatadas que protegen al metal.

En medio acuosos, y a temperaturas bajas a moderadas, el proceso de corrosión que predomina es electroquímico. En el caso de los sondeos las condiciones necesarias para que se produzca corrosión electroquímica son, por una parte la existencia de una diferencia de potencial eléctrico entre dos metales diferentes, o entre dos fragmentos del mismo metal con mínima separación entre ellos, y por otra que el agua del sondeo contenga suficientes sales disueltas como para constituir un "electrolito", es decir, un fluido conductor de corriente eléctrica.

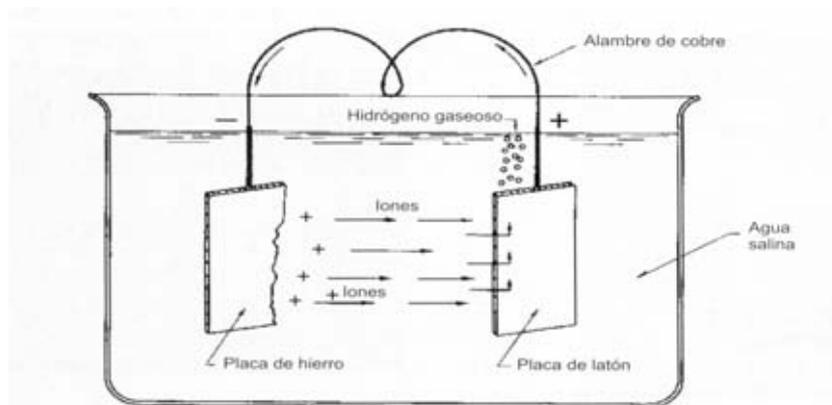


Fig. 10.44. Esquema explicativo de una "pila galvánica".

De aquí que los fenómenos de corrosión electroquímica tiendan a aparecer en las soldaduras, ranurados con soplete, fisuras de recubrimientos, etc.

Del mismo modo, en sondeos en que se combinan tramos de acero al carbono y de acero inoxidable, se produce la denominada corrosión bimetalica, también conocido por "ataque galvánico". Esta corrosión se manifiesta por la disolución acelerada del metal más reactivo.

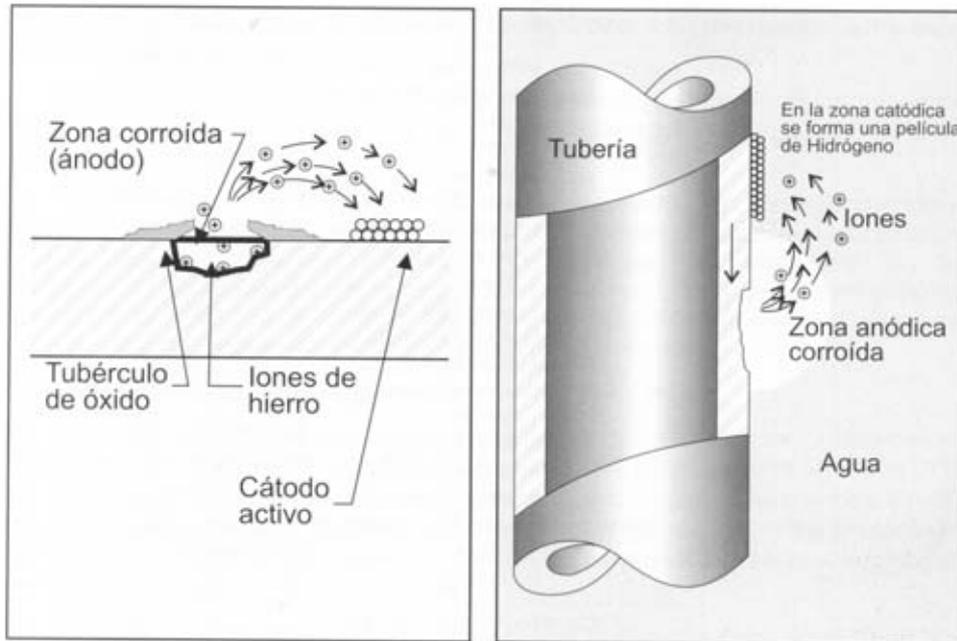


Fig. 10.45. Esquema de funcionamiento de la corrosión electrolítica en las tuberías de los sondeos.



Fig. 10.46. Corrosión de la tubería de chapa de acero al carbono en zona de soldadura entre tramos (foto TRAGSATEC).

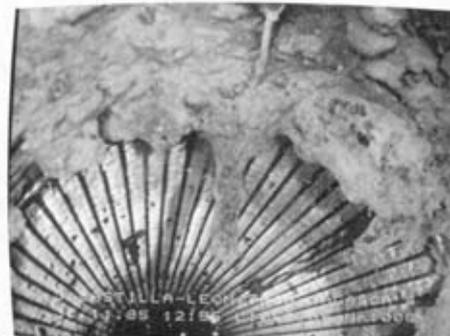


Fig. 10.47. Fenómenos de corrosión-incrustación en la zona de contacto entre un tramo de tubería ciega de chapa de acero al carbono y un filtro de acero inoxidable (foto TRAGSATEC).

En el cuadro adjunto se presenta la "serie galvánica", que permite estimar la diferencia de potencial relativa que se crearía al poner en contacto dos metales de la serie. En esta serie se incluyen la mayor parte de los tipos de tubería metálica que se utilizan en sondeos. Cuanto más separados estén los metales en la serie mayor será la diferencia de potencial que se crearía entre ellos, y mayor por tanto la velocidad de corrosión del menos "noble" de ellos.

Corrosión máxima (ánodo)		
-	8Magnesio	
	Aleaciones de magnesio	
↑	Zinc	↓
	Aluminio 25	
	Cadmio	
C	Aluminio 17 S.T.	P
O	Acero al carbono	R
R	Acero cromado (activo)	O
R	Níquel	T
O	Acero inoxidable 18-8 (activo)	E
S	Plomo-estaño (soldadura)	C
I	Níquel-inconel (activo)	I
O	Cobre-aleaciones de cobre	O
N	Bronce	N
	Soldadura de plata	
↑	Níquel-inconel (pasivo)	↓
	Acero cromado (pasivo)	
	Acero inoxidable 18-8 (pasivo)	
	Plata	
	Oro-platino	+
Protección máxima (cátodo)		

Tabla XXXI. Serie galvánica (modificado de Lauga, 1990).

Los fenómenos de corrosión se aceleran además bajo esfuerzos de tensión (columnas de entubación suspendidas, por ejemplo), o ante temperaturas elevadas (se estima que un incremento de temperatura de 10° C, duplica la velocidad de la corrosión). La velocidad de circulación del agua también es un factor de corrosión.

Por último recordar que, en muchas ocasiones, parte de los productos de la corrosión pueden precipitar en las rejillas y filtros, produciendo efectos de colmatación. Este caso es especialmente frecuente en casos de corrosión electroquímica, en sondeos con aguas ligeramente ácidas, con un total de sólidos disueltos superior a los 1000 mg/l.

También cabe destacar el efecto de autoprotección ("pasivado") que supone la creación de una película sobre el metal atacado, de los óxidos e hidróxidos liberados por los procesos de oxidación/corrosión.

6.2.- CORROSIÓN BACTERIANA.

En su obra "Corrosión bacteriana", CHANTEREAU indica que "la corrosión bacteriana o biológica incluye todo fenómeno de destrucción en el cual estos microorganismos, ya sea que actúen directamente o por medio de las sustancias provenientes de su metabolismo, desempeñan un papel importante al acelerar un proceso ya establecido, o al crear las condiciones favorables para que se produzca dicho fenómeno".

La diversidad de las bacterias es tal que, incluso en las condiciones más desfavorables, casi siempre hay algunas con capacidad para proliferar. Además, las facilidades que el medio ambiente pone para su dispersión son tales que su distribución por la naturaleza es amplísima.

La acción de las bacterias se manifestará allí donde exista hierro, manganeso, sulfatos o derivados azufrados, ..., en presencia de agua, dentro o fuera de conducciones, o bien al aire libre.

No tiene especial sentido aquí el entrar en detalles sobre las numerosas familias de bacterias presentes en el medio natural (ver obra de CHANTEREAU). Tan solo mencionar, por ser las más frecuentes, *Thobacillus Thiooxydans*, y *Desulfovibrio Desulfuricans*. Las primeras consiguen su energía de la oxidación de azufre y tiosulfatos, generando ácido sulfúrico, mientras que las segundas reducen los sulfatos, sintetizando sulfídrico.

6.3.- CORROSIÓN/EROSIÓN MECÁNICA.

Aunque posiblemente sea más correcto hablar de erosión/abrasión que de corrosión, incluimos aquí el "desgaste" de las tuberías -y especialmente los filtros- de los sondeos por efecto del roce de partículas finas arrastradas por el bombeo. El inadecuado diseño del filtro de grava o de las propias rejillas (excesiva entrada de finos), y/o el bombeo a regímenes por encima del recomendado (altas velocidades de flujo), son las causas de este tipo de fenómeno.

7.- TIPOS DE CORROSIÓN.

Atendiendo a la forma de ataque y al efecto que causa en las tuberías metálicas, se suelen considerar cinco tipos de corrosión:

1.- Corrosión uniforme: Es el resultado de una disolución del metal en contacto con la solución corrosiva, con desaparición de la película de protección pasiva, y pérdida de material. En los sondeos esto conduce a una disminución paulatina del espesor de las tuberías, con el consiguiente debilitamiento de las mismas, y/o un incremento del tamaño de las aberturas de la rejilla, facilitando la entrada de partículas al sondeo (colmatación, relleno, averías de bombas,...).

2.- Corrosión galvánica: Por el proceso antes explicado, se produce la corrosión sobre el "ánodo" de la pila galvánica creada al poner en contacto dos metales distintos. Este tipo de corrosión aparece en los sondeos cuando se combinan tuberías de distinta composición, en contactos entre grupo de bombeo y entubación metálica, entre tornillos y bridas en tuberías de impulsión, ...

3.- Corrosión por "picaduras" o alveolar: La formación de perforaciones, que pueden llegar a ser totalmente penetrantes, en la tubería de los sondeos es uno de los peores efectos de la corrosión. Este fenómeno se produce cuando el medio agresivo atraviesa la película de protección pasiva en algunos puntos. Se acentúa así el efecto galvánico, al comportarse las zonas perforadas como ánodos, centrándose en ellos la corrosión. Este tipo de corrosión es bastante frecuente en aguas con elevado contenido en cloro (Cl), bromo (Br) o fluor (F), que pueden desplazar el oxígeno de la película protectora, dejando desprotegidos algunos puntos. En sondeos poco profundos, o en la zona sometida temporalmente a ambiente oxigenado, es bastante frecuente que se formen incrustaciones de óxidos procedentes de la propia corrosión.

4.- Corrosión intergranular y fisurante: Este tipo de corrosión, que tiene un alcance limitado, se manifiesta en forma de microfisuras y resquebrajaduras en la superficie de las tuberías de acero inoxidable. La causa está en las heterogeneidades e impurezas que aparecen en la microestructura del acero, especialmente de nitruro de hierro y el carburo de cromo, más vulnerables que el resto del metal a los fenómenos de corrosión.

La calidad de los aceros es pues de gran importancia

5.- Corrosión selectiva: Este tipo de corrosión se da en casos de tuberías constituidas por aleaciones, especialmente los latones, en que se disuelve por corrosión el componente menos noble (Zn), debilitando la aleación.

6.- Corrosión fisurante: Cuando un metal está sometido a tensión suelen desarrollarse multitud de microfisuras que en un medio agresivo se convierten en fácil punto de ataque para la corrosión. Caso parecido es el efecto de las fatigas de materiales, como es el caso de sectores (principalmente de los equipos de bombeo) sometidos a esfuerzos alternativos de elevada frecuencia. También esos puntos son más sensibles a la corrosión, convirtiéndose así en puntos potencialmente débiles.

8.- PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CORROSIÓN.

Una vez descritas las causas y efectos de la corrosión, vamos a entrar en el capítulo de las medidas de prevención que pueden y deben tomarse para evitar o ralentizar al menos la aparición de estos problemas.

La prevención de los efectos de corrosión debe partir, obviamente, del análisis previo de la agresividad del entorno y de las condiciones de explotación, a los materiales de acondicionamiento del sondeo. Así, a la hora de proyectar el sondeo deberá tenerse en cuenta la naturaleza química del agua y su posible evolución.

Por ejemplo, son aguas potencialmente agresivas aquellas con $\text{pH} < 7$, con baja alcalinidad y dureza. Del mismo modo, elevados contenidos en CO_2 libre (> 50 ppm), presencia de ácidos (HCl , H_2S , H_2SO_4 , ...), indican medios potencialmente corrosivos. En cuanto a los procesos de corrosión electroquímica, se favorecen en aguas de alta conductividad (residuo seco superior a los 700 ppm), aguas con contenidos en ión cloruro superior a 500 ppm.

Un indicador frecuentemente utilizado para evaluar la capacidad corrosiva-incrustante de las aguas, es el denominado "**índice de Ryznar**". Así, este índice, que agrupa el pH, el contenido en iones CO_3^{2-} , la alcalinidad total y el contenido en sales disueltas, nos permitirá adecuar la elección de la naturaleza de la tubería del sondeo al carácter del agua.

En cuanto a la corrosión bacteriana, el potencial de oxidación-reducción (red-ox) del agua y del suelo es un buen indicador de si el ambiente es propicio para el desarrollo de las bacterias sulfo-reductoras. Al parecer las condiciones óptimas para su desarrollo se dan con valores de potencial red-ox menores de 100 milivoltios. De todas formas, como ya se ha indicado, el tema de los desarrollos bacterianos en las aguas subterráneas es bastante complejo al existir gran variedad de especies, aerobias y anaerobias, adaptadas a los más adversos ambientes físico-químicos.

Y, ya dentro del diseño, se seleccionarán los materiales de entubación más adecuados para cada caso, el dimensionamiento correcto de los filtros para lograr bajas velocidades de flujo y retención de fracciones abrasivas, etc.

Por poner algunos ejemplos, la corrosión galvánica en los casos de columnas combinadas de distintos materiales (acero a carbono e inoxidable, por ejemplo) podrá evitarse o retardarse mediante conexiones dieléctricas. En el caso de corrosión por "picaduras" en aguas ricas en elementos halógenos, deberán utilizarse tuberías de aleaciones de acero inoxidable y molibdeno (tipo 316).

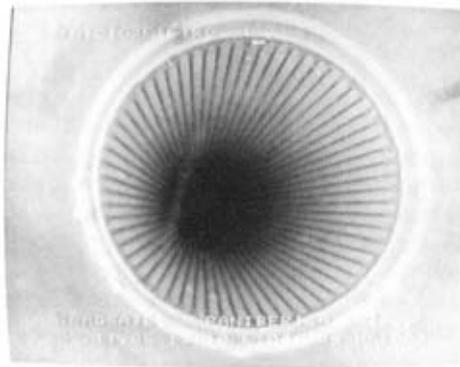


Fig. 10.48. Sondeo entubado con tubería de PVC combinada con tramos de filtro de ranura continua en acero inoxidable (foto TRAGSATEC).

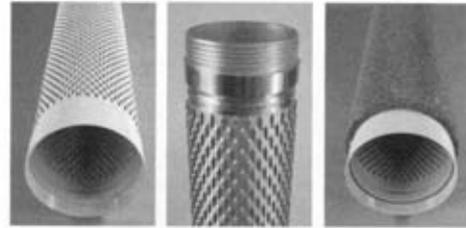


Fig. 10.49. Distintas tuberías y filtros para revestimiento de sondeos en materiales resistentes a la corrosión. (Cortesía de PREUSSAG.)

Las grandes diferencias de coste de los distintos tipos de tuberías metálicas limitarán en cada caso particular la utilización de las más idóneas composicionalmente. Así por ejemplo, las tuberías de acero con contenido superior al 11% de cromo (Cr), o con níquel (Ni) y molibdeno (Mo), son bastante más resistentes a la corrosión que las de acero al carbono, pero también sensiblemente más caras.

Aunque no vamos a entrar aquí en este tema, se recuerda que existen en el mercado varios tipos de tuberías y filtros especialmente indicadas para aguas agresivas. Entre estas cabe destacar las de cloruro de polivinilo puro (P.V.C.), y las metálicas con recubrimientos plásticos o de resinas epoxi. Sin embargo, a la hora de seleccionar este tipo de tuberías, habrá que tener en cuenta otros factores esenciales para la captación, como el área abierta de sus filtros, resistencias a los esfuerzos de tracción y colapso, ...

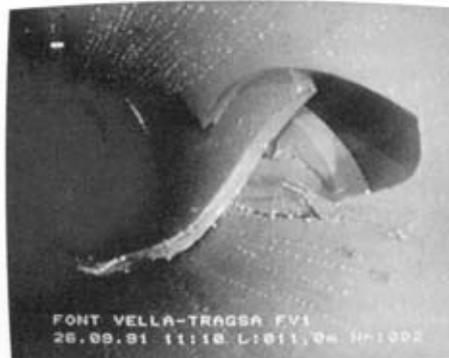


Fig. 10.50. Detalle de sondeo entubado con tubería de PVC inutilizado por colapso mecánico (foto TRAGSATEC).

A continuación se incluye un cuadro orientativo (modificado de Mogg, 1972) con indicación de algunos tipos de tuberías metálicas recomendables para distintos valores del índice de Ryznar del agua.

Tipo de tubería	Índice de Ryznar
Tuberías de plástico	7.5 - 18
Acero de bajo contenido en carbono	7.0 - 8.0
Hierro Armco	6.5 - 8.0
Bronce rojo al silicio	6.0 - 8.5
Bronce everdur (al Si-Mn)	< 9.0
Superníquel	< 9.0
Monel 400	< 9.5
Acero inoxidable 304	< 12.0
Acero inoxidable 304 (bajo en carbono)	< 15.0
Acero inoxidable 316	< 15.0
Acero inoxidable 316 (bajo en carbono)	< 18.0

Tipos de tuberías de sondeos recomendables para distintos tipos de aguas en función de sus índices de Ryznar (modificado de Mogg, 1972).

Vamos a mencionar, por último, los dispositivos de **protección catódica** diseñados para evitar los efectos de la corrosión galvánica, tanto de las tuberías de los sondeos, como de las bombas (especialmente las de ejes verticales).

Como ya hemos explicado, en el sistema eléctrico tubería del sondeo/medio, según la agresividad del último, el metal de la tubería podrá comportarse como ánodo, y por tanto se verá sometido a corrosión. Sin embargo, si conectamos la tubería del sondeo a una masa de metal menos "noble" (Mg, Zn, Al), éste se comportará como un "ánodo de sacrificio", pasando la entubación a formar parte del cátodo del sistema. El ánodo de sacrificio suele introducirse en una pequeña perforación próxima al sondeo y conectada a éste mediante un conductor de cobre debidamente aislado. Esta perforación suele rellenarse de bentonita, yeso u otros materiales que aseguren su contacto con el sistema agua-suelo.

Una variante de este dispositivo consiste en enviar una corriente continua (mediante generador, instalación fotovoltaica), conectando el polo negativo a la entubación a proteger (cátodo), y el positivo a uno o varios electrodos (ánodos).

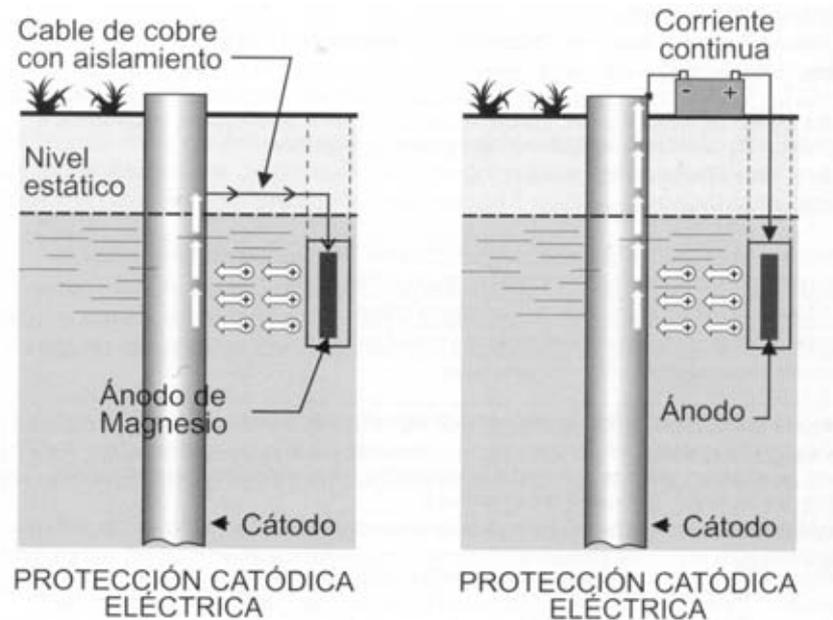


Fig. 10.51. Dispositivo de protección catódica.

9.- CONSIDERACIONES ECONÓMICAS SOBRE LA REGENERACIÓN DE SONDEOS.

No queremos dar por finalizado este tema sin entrar, aunque sea brevemente, en comentarios sobre la "rentabilidad" tanto de las propias operaciones de regeneración, como de los programas de mantenimiento preventivo de los sondeos.

Este tema puede plantearse desde varios frentes:

- 1.- Relación coste de ejecución de sondeo/coste de regeneración del mismo
- 2.- Servicio que proporciona el agua
- 3.- Imperativos legales y otras circunstancias

El primer punto es indudablemente el más complejo al intervenir más factores. De una forma simplista puede decirse que la evaluación de los costes de regeneración de un sondeo puede realizarse en base al análisis de los costes de:

- Operaciones de diagnóstico (ensayos de bombeo, inspección con video-TV, diagráfias, diseño de regeneración).
- Operaciones de regeneración (regeneración mecánica, química, bombeos, sustitución de tuberías).

Mientras que los costes del sondeo de sustitución serían los propios de la obra, más los derivados de las obras complementarias de acondicionamiento de las instalaciones de explotación (línea eléctrica, transformadores, conducciones exteriores) al nuevo sondeo.

Para ilustrar este apartado se reproduce a continuación un cuadro-resumen de una publicación comercial del B.R.G.M., de algunos ejemplos de costes de regeneración de sondeos, frente a costes de sustitución.

Características del sondeo/diagnóstico/regeneración	Coste (%) Reg./sust.
Sondeo somero (20 m); de 2 años; caudal inicial de 20 m ³ /h, actual de 10 m ³ /h. Agua ferruginosa. Uso para regadío. <i>Diagnóstico:</i> Tratamiento químico y bacteriológico, cepillado, esterilización. <i>Resultado:</i> Recuperación del caudal inicial.	53%
Sondeo de 60 m; edad 6 años; caudal inicial de 50 m ³ /h considerado insuficiente. <i>Diagnóstico:</i> Desarrollo incompleto + incrustaciones ferruginosas. <i>Trabajos:</i> Tratamiento químico, pistoneo y air-lift. <i>Resultado:</i> 100 m ³ /h de producción.	29%
Sondeo de 180 m; edad 50 años; caudal inicial de 50 m ³ /h, abandonado por entradas de arena crecientes conforme se aumentaba el caudal de explotación. <i>Diagnóstico:</i> Explotación por encima de su caudal crítico. <i>Trabajos:</i> Ninguno, nueva puesta en servicio a menor caudal. <i>Resultado:</i> Explotación con 30 m ³ /h, sin arenas.	3%
Sondeo de 240 m; edad 7 años; caudal inicial de 165 m ³ /h, descendido a 100 m ³ /h. <i>Diagnóstico:</i> Entubación rota en dos puntos y desplazada con desprendimientos de terreno en el pozo; tuberías y material inadecuados. Rehabilitación aleatoria y muy costosa. Se recomienda el abandono del sondeo. <i>Trabajos:</i> Sondeo nuevo, tuberías de inoxidable (estación termal).	–
Sondeo de 288 m; edad 16 años; caudal inicial de 80 m ³ /h, descendido a 30 m ³ /h. <i>Diagnóstico:</i> Caída de bomba "olvidada" en el fondo del pozo, explotación anterior por encima del caudal crítico ha deteriorado el macizo filtrante, filtros no adaptados y enarenados hasta 15 m de altura. <i>Trabajos:</i> Extracción de filtros y de macizo filtrante, reprofundización de 50 m en el acuífero, instalación nueva. <i>Resultado:</i> Explotación con 30 m ³ /h, sin arenas.	65%
Sondeo de 638 m; edad 15 años; parada de explotación por entrada de agua salada. <i>Diagnóstico:</i> Entubación mal cementada y corroída, las perforaciones permiten entrada de agua de una capa salada antes aislada por la cementación. <i>Trabajos:</i> Encamisado con nuevas tuberías y cementación. <i>Resultado:</i> Retorno a la situación de origen.	56%
Sondeo de 750 m; edad 15 años; caudal inicial de 150 m ³ /h, ahora de 100 m ³ /h. <i>Diagnóstico:</i> Colmatación parcial de filtros. Probable contaminación del macizo filtrante. Incrustaciones, descenso de 5 m del nivel después de 15 años. <i>Trabajos:</i> Tratamiento químico y mecánico, desarrollo. <i>Resultado:</i> Retorno al caudal inicial (salvo la parte correspondiente al descenso de nivel).	9%
Sondeo de explotación petrolífera, entubado hasta 2500 m, abandonado, edad 21 años. <i>Diagnóstico:</i> Posible explotación geotermal. <i>Trabajos:</i> Limpieza del sondeo hasta 1900 m, ranurado de la tubería entre 1700 y 1800 m. <i>Resultado:</i> Producción surgente de 125 m ³ /h a 75 °C.	20%

Tabla XXXIII. Cuadro-resumen de varios casos reales de regeneración de sondeos, con evaluación de la relación costes de regeneración/sustitución. (Traducido de B.R.G.M).

Avanzando más en este campo, algunos proyectistas insisten, con buen criterio, en la necesidad de contemplar en los proyectos de sondeos una serie de costes que definirán en gran medida la rentabilidad final de la obra y su explotación.

Estos costes deberán distribuirse en varios conceptos, como:

1.- Costes de concepción: A la hora de diseñar el sondeo deberá contemplarse el análisis de su previsible deterioro, y sus causas (características físico-químicas del agua y entorno geológico, condiciones de explotación, desarrollos bacterianos,...).

2.- Costes de construcción: A partir de los resultados del estudio precedente, deberán incorporarse a la obra los elementos, materiales y condicionantes de la explotación, que puedan ayudar a retrasar los procesos de envejecimiento del sondeo.

3.- Costes de explotación: A los costes habituales (energía, mantenimiento de las instalaciones de bombeo), habrá que añadir los resultantes de los controles periódicos de evolución de eficiencia, estado de tuberías y filtros, calidad de agua, ...

4.- Costes de mantenimiento: Para mantener la productividad del sondeo y alargar su vida operativa, deberán preverse los costes del mantenimiento: limpieza y desarrollo periódicos, renovación de filtros, etc.

Dentro del plan de mantenimiento podrá haber dos tipos de intervenciones: las "simples", esencialmente test de producción y analítica; y las "complejas", que supondrán una interrupción más o menos prolongada de la explotación del sondeo para la ejecución de ensayos de bombeo, registros ópticos con video-TV, regeneración, etc.

5.- Costes de abandono: Aunque es una práctica desafortunadamente poco usual, es muy recomendable acondicionar adecuadamente un sondeo que vaya a abandonarse. No hay que olvidar que los sondeos, como vías preferenciales de circulación del agua entre superficie y subsuelo, son potenciales focos contaminantes. Por ello deben cementarse y sellarse adecuadamente.

Respecto al segundo "frente", el de los servicios que presta el agua, es evidente que el coste económico de las operaciones de regeneración frente a los de sustitución de sondeos, tiene un peso importante, especialmente cuando el usuario es económicamente sensible.

Y queda por mencionar el tercer "frente", el de los condicionantes legales. Cada día es más frecuente que los países desarrollen normas legales de protección mediambiental relativas a la explotación de las aguas subterráneas. Así, existen bastantes zonas en que está total o fuertemente restringida la perforación de nuevos sondeos, pero generalmente se autorizan los trabajos orientados al mantenimiento y recuperación de los ya existentes.

Como consecuencia de este último apartado, y de la problemática en general, queda resaltar nuevamente la importancia que un adecuado diseño no solo del sondeo en origen, sino también de su programa de mantenimiento y conservación. De esta forma se optimizará la rentabilidad de su producción en todos los aspectos, y en consecuencia de los servicios (abastecimiento, industria, regadío, ...) a que se aplique el recurso.

BIBLIOGRAFIA

- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (1973). "Operating problems, records and maintenance water wells". AWWA Manual M 21, Ground Water. Chapter 8. Denver, Colorado USA.
- CUSTODIO E. y LLAMAS M.R. (1983). "Hidrología Subterránea". Ed. Omega S.A. Barcelona.
- DENUDT H. et RICOUR J. (1990). "Veilleissement du parc de forages et conditions d'abandon des ouvrages de production d'eau dans la Region Nord Pas de Calais". Ann.Soc.Géol.Nord. CIX. B.R.G.M. France.
- CHANTEREAU J. (1985). "Corrosión bacteriana". Ed. LIMUSA. México.
- CUSTODIO E. (1968). "Corrosión e incrustación de pozos". Primer Seminario sobre técnicas modernas para la construcción de pozos". CEIAA-SGOP-INC. Barcelona.
- DRISCOLL F.G. (1987). "Groundwater and Wells", Second ed. Johnson Division Publ. St.Paul, Minnesota USA.
- GIL I., SACRISTAN M.A. y MARTINEZ J.(1991). "Aplicación de los registros ópticos con video-TV para la rehabilitación-regeneración de sondeos". Congreso hispano-luso. S.Fernando de Henares (Madrid).
- GRIERE O. (1990). "Maintenance et rehabilitation des forages de production d'eau". Rev. "Geologues" n° 94. France.
- KERGOSENIEN R., LOGES D. et MEYER M. (1993). "La régénération des puits et forages"
- KERRY F.P.(1990). "Water well regeneration: new technology". International Groundwater Engineering Conference on "The monitoring, maintenance and rehabilitation of water supply boreholes and irrigation tubewells", Bedford UK.
- LAUGA R. (1990). "Pratique du forage d'eau". Sépia Ed. France.
- MAIAUX C., RICOUR J. et NEISS B. (1986). "Pathologie des forages d'eau". T.S.M. L'eau. France.
- MARTINEZ J. (1994) "Incrustación y corrosión en sondeos: técnicas de detección-diagnóstico y sistemas de regeneración". Curso de Planificación, perforación, testificación y regeneración de sondeos.
- MARTINEZ J. (1994)"Optimización de la explotación del agua subterránea dentro del programa de ahorro del agua: aplicación de los sistemas de inspección con video-TV al control y regeneración de sondeos". Simposio sobre el Presente y futuro de los regadíos españoles. CEDEX. Madrid.
- MARTINEZ J.(1994) "Registros ópticos de sondeos con video-TV". Curso de nuevas técnicas de construcción de pozos en terrenos no consolidados. A.I.H./Colegio Oficial de Geólogos. Madrid.
- MARTINEZ J. et al (1995) "Estudio de las incrustaciones desarrolladas en tres pozos de La Moraña y su posible origen biológico" VI Simposio de Hidrogeologías. Sevilla.
- MARTINEZ J. et al (1996)"Técnicas de diagnóstico y regeneración de sondeos. Ultimas experiencias de regeneración de sondeos en la Cuenca del Duero". II Seminario del Agua y Medio Ambiente. Zaragoza.
- MARTINEZ RUBIO, J. y RUANO, P. (1998) "Aguas subterráneas. Captación y aprovechamiento". Ed, PROGENSA.
- MARTINEZ J.(1998) "Testificación de sondeos con televisión. Aplicaciones al control de calidad". Jornadas sobre aguas subterráneas y abastecimiento urbano. Club del Agua Subterránea/ITGE.
- MARTINEZ J. et al (1999) "Detección de incrustaciones de origen biológico (biofouling) en captaciones de aguas subterráneas" Jornadas de actualidad de técnicas geofísicas aplicadas a la Hidrogeología". ITGE. Granada, 1999
- MARTINEZ J. et al (1999) "Conservación y rehabilitación de pozos para regadío" Congreso Ibérico sobre Planificación y Gestión de Aguas. Zaragoza, 1999
- RICOUR J. (1990). "Le coût global des ouvrages souterrains: application aux forages de production d'eau". Rev. de l'eau, l'industrie et les nuisances, n° 136. France.
- THOMAS J.M. (1985). "La régénération des puits et forages a l'aide du Herli-Rapid". TWF, I.P.F. France.
- WEST J.M. et al (1986). "Corrosión y oxidación. Fundamentos." Ed. LIMUSA, México.