



Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados

Nombre de la Subgerencia

UEN INVESTIGACION Y DESARROLLO

Limpieza de pozos en Sand Box

Autor: Andrés Lazo Páez

Revisado: German Mora Rodríguez

Aprobado: German Mora Rodríguez

Agosto / 2020

San José



Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
Centro de Documentación e Información
UEN Investigación y Desarrollo



**AUTORIZACIÓN INSTITUCIONAL PARA PUBLICAR TESIS, ESTUDIOS,
ARTÍCULOS Y/O INFORMES PROPIEDAD INTELECTUAL DE AyA EN EL
REPOSITORIO DIGITAL DEL CEDI**

Yo, **Eric Alonso Bogantes Cabezas**

N° Cédula: 5-251-0327

Dependencia: **Gerencia General**

Autorizo como Gerente General y representante legal del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) cédula jurídica 4-000-042138 al Centro de Documentación e Información (CEDI) de la UEN Investigación y Desarrollo la inclusión, publicación y difusión en su Repositorio Digital y Catálogo en línea (OPAC).

Se trata de estudios y documentos cuyos derechos intelectuales y de uso son exclusivos de nuestra institución.

E-mail: gerenciageneral@aya.go.cr N° Teléfono: 2242-5090



Firmado digitalmente
por ERIC ALONSO
BOGANTES CABEZAS
(FIRMA)
Fecha: 2021.06.16
17:21:24 -06'00'

Firma: _____

Limpieza de pozos en Sand Box

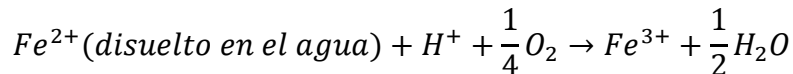
Origen del problema

En ciertas áreas, un tema muy común es la necesidad de realizar mantenimiento de pozos por acumulación de bacterias procesadoras de hierro. Este tipo de microorganismos pueden crecer en la bomba y en la rejilla del pozo, e incluso en la formación donde se ubica el acuífero propiamente. Si no se genera una rutina de mantenimiento debidamente programada, estas bacterias y sus efectos colaterales pueden reducir la eficiencia de un pozo de agua en un periodo de tiempo muy corto (National Driller, 2004).

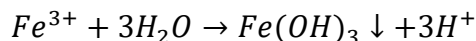
Existe una variedad bastante amplia de bacterias procesadoras de hierro, las cuales usualmente son largas, en forma de filamentos, y tienen la propiedad de secretar una “baba” o biopelícula; ésta consiste en material extracelular que se excreta, principalmente polisacáridos (Hacket & Lehr, 1985). Justo este material permite que las bacterias se adhieran a un sustrato hasta formar incluso una cubierta protectora. El efecto es acumulativo, de forma que nuevo crecimiento bacteriano se presenta sobre material biológico de mayor edad, formando un depósito compuesto por varias capas. Este tipo de biopelícula es un material gelatinoso de color café que puede atascar las aberturas de la rejilla del pozo e incluso se puede depositar en algunas secciones de la bomba (National Driller, 2004). Los principales microorganismos identificados son (Hacket & Lehr, 1985):

1. Especies de *Gallionella*
2. Grupo *Sphaerotilus-Leptothrix*
3. Especies de *Sidereocapsa*

En general, las bacterias crecen por medio de la producción de enzimas que catalizan (o promueven) reacciones químicas que tienen que ver con hierro disponible en el agua subterránea. Un subproducto de la reacción es la liberación de pequeñas cantidades de energía, la cual es utilizada por las bacterias para crecer y multiplicarse. Las bacterias procesadoras de hierro convierten el hierro ferroso a hierro férrico de la siguiente manera:



El hierro férrico (Fe^{3+}) e incluso algunos de sus óxidos posteriormente reaccionan con el agua para formar hidróxidos y algunos otros complejos, según se indica a continuación:



Algunas reacciones similares pueden ocurrir con el manganeso, formando precipitados insolubles. De momento, no existe claridad acerca de la manera en que interviene el hierro en las funciones metabólicas de las bacterias. Según Hacket & Lehr (1985) algunos autores indican que las bacterias procesadoras de hierro son quimioautótrofas, por lo que utilizan la energía liberada por la oxidación del hierro ferroso para asimilar carbono

inorgánico para crecimiento celular y desarrollo. Otras fuentes indican que algún grupo de bacterias crece bien bajo condiciones heterotróficas; es decir, utilizan carbono orgánico como fuente de energía y para desarrollo celular.

En general, los aspectos ambientales que deben estar presentes para que las bacterias crezcan son (National Driller, 2004):

1. Una fuente de hierro ferroso (Fe^{2+}) disuelto.
2. Oxígeno.
3. pH adecuado.

Típicamente el hierro ferroso se crea en un ambiente anaeróbico que se presenta en material granular fino o incluso en el acuífero profundo propiamente. Al momento de perforar un pozo, hay un área alrededor de la rejilla y la bomba que consiste en una zona aeróbica rodeada de otras secciones con cada vez menos oxígeno. Esta es justo la condición que favorece el crecimiento de bacterias que oxidan el hierro. Es común considerar que los depósitos de material orgánico ferroso se componen de:

1. Masa bacteriana.
2. Hidróxidos de hierro y manganeso (insolubles).
3. Sedimento fino adherido a la cubierta bacteriana gelatinosa.

Desde el punto de vista del origen de estas bacterias, Hacket & Lehr (1985) indican que algunos autores señalan ciertos principios básicos:

1. Las bacterias que provocan depósitos de hierro son propias de aguas que contienen hierro, procedentes de minas, pozos y nacientes.
2. Ciertos tipos de bacterias presentes en agua y suelo, incluso aquellas no filamentosas capaces de oxidar el hierro, pueden también precipitar el hierro a partir de soluciones que contengan sales de hierro de ácidos orgánicos.
3. Todos estos tipos de microorganismos pueden ser introducidos en aguas subterráneas por medio de fisuras en el suelo u otras formas de contacto (incluso infiltración de aguas).

Mayor detalle sobre la clasificación taxonómica y ocurrencia de estos microorganismos en el medio ambiente se puede encontrar en la publicación de Hacket & Lehr (1985). Estos mismos autores indican que las condiciones ambientales bajo las cuales se favorece el crecimiento bacteriano son las que se muestran en el cuadro 1. Según la información tabulada, las bacterias procesadoras de hierro presentes en agua con hierro bajo condiciones neutras de pH y potenciales redox relativamente bajos. Estos organismos son microaerófilicos y requieren muy poco material orgánico para su crecimiento, con la excepción de la *Gallionella* quimioautótrofa.

Cuadro 1 Condiciones ambientales favorables para el crecimiento de bacterias procesadoras de hierro (Hacket & Lehr, 1985).

| Parámetro | Intervalo | Organismo |
|----------------------------|------------------|--|
| Potencial REDOX | +200 - +320 mV | Gallionella |
| | > -10 mV ± 20 mV | Gallionella y Siderococcus |
| pH | 6.5 a 7.6 | Gallionella y Siderococcus |
| | 6.0 a 8.0 | Gallionella y Sphaerotilus |
| | 6.0 a 7.6 | Gallionella |
| | 6.0 a 8.7 | Siderocapsaceae |
| | 6.7 a 7.7 | Clonothrix, Crenothrix, Leptothrix y Siderocapsa |
| Intensidad reductiva | > 14.5 ± 1 | Gallionella y Siderococcus |
| | 19 a 21 | Gallionella |
| | < 19 | Siderocapsaceae |
| Hierro ferroso disuelto | 5 a 25 mg/L | Gallionella |
| | > 0.2 a 0.5 mg/L | Gallionella y Siderococcus |
| | > 0.25 mg/L | Gallionella y Sphaerotilus |
| | 1.0 a 2.0 mg/L | Siderocapsaceae |
| | 0.2 a 5.0 mg/L | Clonothrix, Crenothrix, Leptothrix y Siderocapsa |
| Oxígeno disuelto | 0.1 a 1.0 mg/L | Gallionella |
| | < 5 mg/L | Gallionella y Siderococcus |
| | 1.0 a 3.0 mg/L | Gallionella y Sphaerotilus |
| | < 1.0 mg/L | Siderocapsaceae |
| Demanda química de oxígeno | < 12 mg/L | Gallionella |
| | > 5 a 25 mg/L | Gallionella y Siderococcus |
| Temperatura | 8 a 16 °C | Gallionella |
| | 10 °C | Gallionella y Sphaerotilus |
| Dióxido de carbono | > 20 mg/L | Gallionella |

Efectos por la presencia de bacterias procesadoras de hierro

Estos organismos pueden provocar problemas de atascamiento en drenajes, sistemas de abastecimiento de agua y pozos. Tal y como se mencionó anteriormente, esto se produce por la habilidad que tienen de precipitar hierro férrico en diferentes formas, además de producir material extracelular polisacáridos, casi con una apariencia de polímero orgánico, lo cual encapsula, protege y adhiere las paredes celulares de estas bacterias.

Para el caso de pozos, la acumulación de estos materiales ocurre en las rejillas, los empaques de grava, las entradas del equipo de bombeo, tuberías, filtros y otros componentes accesorios. La principal manifestación del problema es la pérdida de eficiencia hidráulica en el pozo, incluyendo la capacidad específica y provocando incluso niveles de bombeo menores. Usualmente, este fenómeno bioquímico se distingue de una deposición química por la rápida disminución de la producción en los pozos, pudiendo

llegar incluso a caídas anuales de hasta un 75% (Hacket & Lehr, 1985). El mismo autor reporta períodos recurrentes de rehabilitación del pozo de hasta cada 2 o 3 años.

Por otra parte, estos microorganismos pueden atacar superficies metálicas ferrosas, con el fin de utilizar este elemento básico para su crecimiento. Incluso cuando la superficie no es metálica, estas bacterias se pueden depositar, al mismo tiempo que promueven procesos electrolíticos que pueden favorecer el crecimiento de otros microorganismos que sí están directamente relacionadas con la corrosión metálica.

Metodologías químicas de control

Se han propuesto numerosas alternativas, dentro de las que se encuentran: desinfectantes, sales de cobre, ácidos orgánicos e inorgánicos, surfactantes y algunos productos patentados. Hacket & Lehr (1985) indican que entre los productos más comunes en este tipo de limpiezas son: hipoclorito de calcio y sodio, ácido clorhídrico (muriático), y ácido sulfámico. Debido a la gran variabilidad de las afectaciones, siempre se recomienda crear un programa periódico de limpieza, con el fin de controlar estos organismos.

Las principales categorías de productos empleados en estos procedimientos son: desinfectantes, ácidos y surfactantes. Estas sustancias pueden ser utilizadas individualmente o en series alternas; por ejemplo: ácidos seguidos por desinfección. Ahora bien, algunas razones por las cuales se cree que algunas limpiezas son ineficientes son las siguientes:

1. Uso de agentes químicos inadecuados para penetrar los depósitos de hierro férrico hidratado y los depósitos extracelulares de las bacterias.
2. Casos en los que se presentan temperaturas bajas del agua, ya que la actividad del agente químico se reduce.
3. Las bacterias procesadoras de hierro son psicrófilas, por lo que crecen mejor a bajas temperaturas. También en estas condiciones tienen bajas tasas metabólicas, lo que resulta en menos absorción del agente químico.
4. Uso de agentes químicos que pueden ser neutralizados o inactivados por la presencia de otras sustancias orgánicas o inorgánicas en el agua subterránea. Esto puede afectar la concentración del ingrediente activo.
5. Posible efecto de dilución por hidráulica subterránea en el sitio del pozo.
6. Posible crecimiento de las bacterias fuera del área de tratamiento químico, lo cual puede producir un arrastre posterior de bacterias activas desde zonas “no limpias” hasta la “zona limpia”.

7. Uso de productos que no tienen prueba científica de ser bactericidas, para las bacterias procesadoras de hierro.
8. Falta de definición de criterios certeros, tales como: concentración de productos químicos, tiempos de contacto, y método de aplicación.

Desinfectantes

Estos productos son empleados directamente para destruir o inactivar las células de las bacterias procesadoras de hierro. Según Hacket & Lehr (1985), los compuestos de cloros comúnmente utilizados para desinfección son útiles para procesos de limpieza de pozos afectados por bacterias de hierro. Algunas experiencias reportadas por el autor, han demostrado que concentraciones de cloro residual libre entre 300 y 500 mg/L por al menos 18 h de contacto han sido efectivas. Igualmente, se ha demostrado que el uso de concentraciones más bajas (25 mg/L de cloro residual libre) por al menos 24 horas, también permite iniciar el proceso de erosión de las biopelículas en las paredes internas del pozo.

Como parte de los procedimientos que se han desarrollado para limpieza de pozos con desinfectantes, se han establecido algunos pasos generales que deben considerarse (Hacket & Lehr, 1985):

1. Preparar una dosis de cloro que permita obtener un cloro residual libre entre 300 y 500 mg/L en el pozo.
2. Adicionar el producto químico hasta lograr la concentración de cloro residual libre en el pozo.
3. Forzar el agua clorada hacia la formación geológica de donde proviene el agua, por medio de técnicas para agitación (mecánica o aire). Esto permite enviar el agua clorada a la formación geológica al mismo tiempo que agita las zonas donde hay depósitos biológicos con hierro. Esto ayuda a un mejor contacto del ácido hipocloroso con las bacterias.
4. Agitación periódica (cada 3 o 4 horas) durante un período de al menos 24 horas totales, al mismo tiempo que se revisa que la concentración de cloro residual libre no disminuya. En caso de que haya una disminución, se debe adicionar cloro para mantener los valores deseados.
5. Poner en operación el pozo luego de 24 h para eliminar el agua clorada y luego se inicia la operación normal. En ocasiones, se requieren tres o cuatro tratamientos seguidos para incrementar la posibilidad de que el agua clorada haya alcanzado la formación geológica circundante.

Adicionalmente a los pasos anteriores, National Driller (2004) recomienda considerar lo siguiente:

1. Limpieza de la bomba y la columna respectiva con una solución de cloro de 1000 mg/L.
2. Tratamiento del agua clorada que se expulsa del pozo.
3. Luego de la limpieza, medir la capacidad específica (tasa de extracción vs abatimiento) en intervalos regulares. Cuando este parámetro se disminuya entre un 10 a un 20%, se requiere realizar el mantenimiento de nuevo, aunque con una concentración de cloro residual libre menor, por ser una labor más temprana.

En términos de otros estudios, se ha documentado que otros desinfectantes como las sales de amonio cuaternario también se han utilizado para procedimientos de limpieza. Sin embargo, existe una condición limitante para las dosificaciones, que es la cantidad de células presentes por cada 15 mL de cultivo. El cuadro 2 demuestra la importancia de estimar la concentración adecuada de ingrediente activo, para cada caso.

Cuadro 2 Concentraciones para control de bacterias procesadoras de hierro, referidas al ingrediente activo de algunos oxidantes comerciales (Hacket & Lehr, 1985).

| Desinfectante (@ pH = 7.4) | Concentración de células de bacterias de hierro (células por 15 mL) | | | | |
|---|---|------------|----------------|------------------|----------------------|
| | +30 a 100 | 300 a 1000 | +3000 a 10,000 | 70,000 a 100,000 | +700,000 a 1,000,000 |
| Javex (hipoclorito de sodio, 5.5% cloro disponible) | 250 | 750 | 850 | 1000 | 10,000 |
| HTH (Hipoclorito de calcio, 70% cloro disponible) | 2000 | 5000 | 7500 | 10,000 | 100,000 |
| IP (Polímero yoduro – “iodine polymer) | 10 | 20 | 30 | 40 | NC* |
| Sulfato de cobre | 500 | 1000 | 5000 | 50,000 | 10,000 |
| Permanganato de potasio | 10 - 20 | 100 | 250 | 500 | 5000 |

* Sin control, debido a que la solubilidad del IP en agua es muy baja.

+ Datos extrapolados.

Ácidos

El principal beneficio de utilizar ácidos es la habilidad de disolver químicamente los depósitos de hierro férrico hidratado que se acumulan alrededor de las bacterias procesadoras de hierro. Adicionalmente, algunos ácidos con altas concentraciones pueden ayudar a dispersar y liberar el material extracelular secretado y depositado por las bacterias (Hacket & Lehr, 1985). Algunos autores reportan uso de concentraciones

de 40 mg/L de ácido acético y 73 mg/L de ácido clorhídrico para inhibición de Gallionella. Adicional, ciertos ácidos comerciales se emplean en concentraciones cercanas al 5% (50,000 mg/L) por períodos de contacto cercanos a 36 horas. National Driller (2004) indica la necesidad de alcanzar un pH menor a 2.

El ácido más comúnmente utilizado es el clorhídrico (HCl) y el sulfámico (NH₂SO₃H). El ácido muriático (clorhídrico) usualmente se comercializa cerca del 28%. También es posible conseguirlo con agentes inhibidores de corrosión, para proteger superficies metálicas existentes en el pozo. El ácido sulfámico se comercializa como un material granular; su solubilidad se incrementa con la temperatura hasta valores entre 15 y 20% (m/m) en las temperaturas más comunes de las aguas subterráneas. Es claro que el ácido sulfámico es menos fuerte que el clorhídrico, por lo que presenta menor tendencia a la corrosión.

Por su parte, National Driller (2004) indica que ácidos inorgánicos como el HCl permiten remover precipitados insolubles de hierro y manganeso, mientras que los orgánicos como el ácido hidroxiaético (HOCH₂CO₂H) permiten remover el material bacteriano extracelular que se acumula, junto con incrustaciones de carbonato de calcio o magnesio. En muchas ocasiones se recomienda el uso combinado de ácidos inorgánicos y orgánicos.

Similar al caso de los desinfectantes, la concentración de ingrediente activo y el tiempo de contacto resultan fundamentales para un buen tratamiento. Es común que también se establezcan relaciones con respecto a la densidad de organismos en la zona de tratamiento. Un esquema que ha sido recomendado para aplicaciones de estos ácidos es el que se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 3 Opciones de tratamiento potencial con reactivos ácidos, para control de bacterias procesadoras de hierro (Hacket & Lehr, 1985).

| Densidad de bacterias procesadoras de hierro (células/mL) | Parámetro | Tratamiento químico | |
|---|-------------------|---------------------|-----------------|
| | | Ácido clorhídrico | Ácido sulfámico |
| 1 a 300 | Concentración (%) | 14 | 7.5 |
| | Tiempo (h) | 6 | 12 |
| 300 a 5,000 | Concentración (%) | 18 | 10 |
| | Tiempo (h) | 12 | 24 |
| 5000 a 50,000 | Concentración (%) | 21 | 10 |
| | Tiempo (h) | 24 | 48 |

De acuerdo con la información tabulada, las concentraciones de ácido pueden variar entre 7.5 y 21%, mientras que los tiempos de contacto se pueden ubicar entre 6 y 24 h. Ahora bien, el método de aplicación de estos ácidos al pozo durante el tratamiento antibacterial es importante. Debido a que estos ácidos son más densos que el agua, el ácido debe ser introducido a la zona objetivo por medio de un tubo conductor, en dirección descendente. Conforme se va distribuyendo, es necesario agitar de manera uniforme en la zona de tratamiento; se puede emplear algún sistema para generar chorros de agua a

presión, agitación mecánica o aire comprimido para que el fluido se distribuya en la formación geológica, y también para destruir los depósitos.

Es muy común el uso de ácidos seguidos de agentes desinfectantes. El ácido ataca los depósitos y el desinfectante cumple una función bactericida. Esta secuencia de tratamiento se puede repetir varias veces con el fin de generar una labor de limpieza eficiente. Particularmente National Driller (2004) sugiere el siguiente protocolo de uso:

1. Remover la bomba y la columna.
2. Agregar la cantidad y combinación adecuada de ácidos según las indicaciones del fabricante, usualmente con un tubo "tremie" dirigido a la sección de rejilla. No se sugiere la dilución total en el pozo.
3. Permitir un tiempo de contacto entre 24 y 48 h. Tiempos mayores pueden provocar que agentes quelantes pierdan efectividad, provocando re-precipitación.
4. Agitar el pozo cada 3 o 4 horas.
5. Limpiar la columna y la bomba con una disolución de cloro con 1000 mg/L o con un tratamiento ácido sugerido por el fabricante. Posteriormente, se debe limpiar con agua purificada.
6. Instalar la columna y la bomba.
7. Purgar el pozo hasta que el pH alcance su valor normal.
8. Tratar el agua purgada.
9. Luego de la limpieza, medir la capacidad específica (tasa de extracción vs abatimiento) en intervalos regulares. Cuando este parámetro se disminuya entre un 10 a un 20%, se requiere realizar el mantenimiento de desinfección, aunque con una concentración de cloro residual libre menor, por ser una labor más temprana.

Surfactantes

Estas sustancias pueden ser empleados, especialmente en conjunto con desinfectantes. Su capacidad detergente permite que se adhieran a partículas iónicas, como las arcillas, coloides y iones metálicos. De esta manera forman partículas largas y complejas con la misma carga eléctrica. Debido a que cargas iguales se repelen, estas partículas se parten y se dispersan (Hacket & Lehr, 1985).

Es común el uso de fosfatos de sodio (polifosfatos) pues son capaces de dispersar efectivamente los depósitos de hierro férrico hidratado que rodean los organismos. Típicamente, se utilizan en concentraciones cercanas a 3%. Adicionalmente, un mínimo

de 50 mg/L de cloro residual libre se aplica siempre junto con el polifosfato, para asegurar el crecimiento de bacterias que podrían utilizar el polifosfato como nutriente (Hacket & Lehr, 1985). En consecuencia, es posible utilizar:

- Polifosfato como pre-tratamiento, seguido de un desinfectante.
- Polifosfato al mismo tiempo que un desinfectante (compatible), para promover una mayor penetración de las bacterias procesadoras de hierro por medio del bactericida.

Como parte de su protocolo de aplicación, los polifosfatos se disuelven lentamente en un tanque de mezcla para luego poder incorporarlos al pozo en disolución. Igual que en el caso de otros tratamientos químicos, una vez que el producto está en el pozo se debe proveer agitación mecánica vigorosa (agua a presión). Se requieren dos o más tratamientos sucesivos para aumentar la probabilidad de que la disolución química sea forzada a penetrar en la formación geológica circundante.

Metodologías físicas de control

Este tipo de métodos ha recibido mucho menos atención que las alternativas químicas, pero es objeto de investigación permanente. El fin que se busca es la destrucción de los organismos que provocan la afectación, así como la alteración del agua subterránea y el ambiente del pozo, o bien incluso manipular el crecimiento bacteriano. Los métodos físicos más destacados son: luz ultravioleta, vibración ultrasónica, tratamiento térmico (pasteurización) y cambio del potencial redox del agua subterránea (Hacket & Lehr, 1985).

Luz ultravioleta

Aunque se trata de un método físico bactericida ampliamente utilizado en aguas, no se considera apropiado para este tipo de aplicaciones. El agua circundante debe estar lo menos turbia posible debido a que los microorganismos deben absorber la radiación ultravioleta para que se dé la desnaturalización de nucleoproteínas esenciales, lo que causa su inactivación. Sin embargo, esta condición del agua no es posible garantizarla en casos con algún grado de afectación por bacterias procesadoras de hierro.

Vibración ultrasónica

Si bien es posible aplicar ondas de sonido para tratar de desintegrar células bacterianas, se ha reportado que las bacterias procesadoras de hierro son altamente resistentes. Se cree que esta condición se debe a la cobertura de material extracelular.

Tratamiento térmico

La pasteurización requiere el incremento de temperatura en el fluido a 60 °C por al menos 30 minutos. Es sabido que las bacterias procesadoras de hierro son psicrófilas (temperatura óptima de crecimiento 10 °C). Por ello, cuando la temperatura se eleva a un intervalo entre 32 y 45 °C, cesa el crecimiento bacteriano y la capa extracelular se

empieza a disminuir. Conforme el agua sube a más de 54 °C, las células bacterianas mueren rápidamente. Por tanto, se trata de elevar la temperatura del agua durante un tiempo específico.

Aunque se han reportado buenos resultados por la aplicación de tratamiento térmico, el período de recurrencia de la colonización bacteriana en el pozo, con su respectiva disminución de producción, es bastante corto.

Cambio del potencial redox

Ya se ha establecido que para valores de potencial redox entre -10 mV y +350 mV, hay una alta probabilidad de que las bacterias procesadoras de hierro compitan por cantidades limitadas de oxígeno para el proceso de oxidación. Es por ello que la alteración del potencial redox es una alternativa que tiene sentido técnico. Hacket & Lehr (1985) indican que lo más recomendado es utilizar pozos de aireación para promover el crecimiento bacteriano en un área lejana de los pozos de producción.

El proceso de oxigenación del agua crea una zona, lejos del espacio para producción, favorable para el crecimiento bacteriano y para la precipitación de óxidos de hierro y manganeso. Como resultado, los metales disueltos en el agua subterránea que circula a través de la zona de elevado potencial redox tienden a precipitar y depositarse. El agua subterránea que recarga la producción tendrá una menor concentración de metales, siempre y cuando la hidráulica subterránea sea favorable.

Existe alguna duda respecto al potencial de atascamiento de la formación geológica, lo cual podría reducir la producción de los pozos. Sin embargo, no existe evidencia contundente acerca del tiempo que tomaría la consolidación de este fenómeno. Es importante considerar costos de capital, y algunos operativos que tienen carácter continuo.

Experiencia en AyA

Solamente se conoce experiencia de limpieza de pozos afectados por bacterias procesadoras del hierro en la Región Metropolitana. El funcionario Malaquías Ramírez describe el procedimiento que aplican de la siguiente manera:

- La limpieza se realiza levantando el equipo de bombeo una altura mínima necesaria para colocar una tubería en la salida del pozo, la cual permita hacer que el líquido extraído del pozo se recircule hacia el mismo.
- Se deja así un par de días y seguido se procede a sentar el equipo en su lugar normal.
- Luego por medio de la tubería de limpieza del pozo se deja correr el líquido extraído hasta que desaparezcan rastros del tratamiento.

Ramírez (2020), sugiere el uso de dos productos. Uno de ellos (AQUA-CLEAR® MGA) es una combinación de ácido sulfámico (60-100%) y cloruro de sodio (10-30%). El segundo (AQUA-CLEAR® AE) es ácido hidroxiacético (30-60%). Es decir, es una combinación de ácido orgánico con inorgánico en este caso. No parece que se realice procedimiento de desinfección o aplicación de algún surfactante. El costo de cada producto es el siguiente:

- AQUA-CLEAR® MGA: cubeta con polvo granular 50 lb – \$190,000
- AQUA-CLEAR® AE: cubeta con líquido ambar 5 gal – \$183,000

Abordaje

Considerando el corto tiempo disponible para buscar una solución, se considera que las técnicas químicas son las más consolidadas. Es importante que al momento de planificar una limpieza especializada por primera vez se busque la asesoría del caso con empresas que realicen este tipo de trabajos en forma rutinaria. Además, es importante que se tomen en cuenta los factores identificados en la literatura, para cada producto químico empleado:

1. Secuencia por utilizar: ácido inorgánico + ácido orgánico + desinfectante, o cualquier otra.
2. Posibilidad de realizar un recuento de células de bacterias procesadoras de hierro en el pozo.
3. Concentración por utilizar de cada producto.
4. Cantidad por utilizar para cada producto.
5. Forma de preparar el producto para ser aplicado al pozo.
6. Forma de medir la concentración de cada producto en el pozo, o al menos para aproximar una buena aplicación.
7. Tiempo de contacto por aplicar.
8. Método para disposición final de residuos.
9. Cantidad de repeticiones.
10. Monitoreo previo y posterior de la capacidad específica.

De ser posible, se recomienda también realizar un benchmarking con varias casas fabricantes, que permitan examinar y comparar diferentes recomendaciones para buscar el mejor resultado posible. No se cuenta con la información detallada de los pozos

objetivo de la limpieza, por lo que de momento no fue posible estimar el costo de una posible aplicación de AQUA-CLEAR® u otro producto similar.

Bibliografía

- Hacket, G.; Lehr, J. *Iron bacteria occurrence, problems and control methods in water wells*. Worthington: National Water Well Association. (1985)
- National Driller, (2004). *Iron Bacteria in Water Wells: Maintenance recommendations and remediation techniques*. [En línea] Disponible en: <https://www.nationaldriller.com/articles/86301-iron-bacteria-in-water-wells-maintenance-recommendations-and-remediation-techniques> [Accesado 04 Junio 2020]
- Ramírez, M. *Limpieza de pozos afectados por hierro*. [Correo electrónico] (Comunicación personal, 26 Febrero 2020).