



INSTITUTO COSTARRICENSE DE
ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS

Alternativas para rehabilitación química de los pozos Sand Box 2 y 3: lecciones aprendidas

Fecha de entrega: 14 de mayo de 2021

CONSECUTIVO DEL DOCUMENTO: 2020-106-74



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



Firma: _____

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



Macroproceso:
Gestión Técnica

Proceso: Investigación
y Desarrollo

Subproceso: Asesoría Técnica

Fecha de
entrega: 14 de
mayo de 2021

Nº de Versión:
01

Elaborado por:
Laura Hernández

Revisado por:
Andrés Lazo Pérez

Aprobado por:
German Mora Rodríguez

Fecha de aprobación:
07/08/19

TABLA DE APROBACIONES DEL REGISTRO

Elaborado y revisado por:

JOSE
MATARRITA
CORTES
(FIRMA)

Firmado
digitalmente por
JOSE MATARRITA
CORTES (FIRMA)
Fecha: 2021.06.03
07:18:39 -06'00'

José Matarrita Cortés

Región Huelar Caribe

JEISSON CHAVES
GAMBOA
(FIRMA)

Firmado digitalmente
por JEISSON CHAVES
GAMBOA (FIRMA)
Fecha: 2021.06.04
14:33:20 -06'00'

Jeisson Chaves Gamboa

UEN Administración de Proyectos

RAFAEL ANGEL
OROZCO
CAMPOS
(FIRMA)

Firmado
digitalmente por
RAFAEL ANGEL
OROZCO CAMPOS
(FIRMA)
Fecha: 2021.06.04
15:01:00 -06'00'

Rafael Orozco Campos

UEN Investigación y Desarrollo



Macroproceso: Gestión Técnica	Proceso: Investigación y Desarrollo	Subproceso: Asesoría Técnica	Fecha de entrega: 14 de mayo de 2021	Nº de Versión: 01
Elaborado por: Laura Hernández	Revisado por: Andrés Lazo Páez	Aprobado por: German Mora Rodríguez	Fecha de aprobación: 07/08/19	

ANDRES
LAZO PAEZ
(FIRMA)
Firmado digitalmente
por ANDRES LAZO
PAEZ (FIRMA)
Fecha: 2021.08.08
14:21:00 -0500
Andrés Lazo Páez

UEN Investigación y Desarrollo

Aprobado por:

GERMAN
GUSTAVO MORA
RODRIGUEZ
(FIRMA)
Firmado digitalmente
por GERMAN
GUSTAVO MORA
RODRIGUEZ (FIRMA)
Fecha: 2021.08.08
20:17:43 -0500
German Mora Rodríguez

German Mora Rodríguez

UEN Investigación y Desarrollo



RESUMEN EJECUTIVO

La operación de pozos cuya agua cuenta con presencia de hierro y manganeso es diferente a la de otros casos en los que no existen afectaciones a la calidad del agua. Es conocido que los dos metales citados tienen la facultad de manifestarse como materia insoluble en agua al ser expuestos a diversas condiciones ambientales específicas (oxígeno disuelto, potencial de oxidación – reducción, potencial de hidrógeno, fuentes de alimento para bacterias, etc). En estas transformaciones influye de manera complementaria la presencia de bacterias capaces de transformar principalmente el hierro en algunas formas de biopelícula y depósitos minerales, los cuales pueden llegar a afectar la producción de un pozo.

En el caso de Sand Box, desde el año 2019 se nota un decrecimiento en la capacidad específica de algunas de sus fuentes subterráneas. En el mes de agosto del año 2019 el pozo 2 mostraba un valor cercano a 4 [(L/s)/m], lo cual se redujo hasta 1.4 [(L/s)/m] durante mayo del año 2020. Un fenómeno similar se observa en el pozo 3, el cual observó un cambio de 3.6 [(L/s)/m] hasta 0.8 [(L/s)/m] en el mismo período de tiempo. Esto implica reducciones de su productividad (medida como capacidad específica) entre un 64% y un 78% respectivamente.

Ante esta situación, se formuló una estrategia de atención con base en una limpieza química de los pozos. La misma tomó como referencia diversa literatura científica publicada, así como un estudio del mercado local destacado en el campo de perforación y mantenimiento de este tipo de obras. Como resultado de esta gestión se obtuvo una única oferta de servicios, por un monto cercano a los \$ 10 000 000. Tomando como base el dato de capacidad específica reportado para mayo 2020, los resultados obtenidos indicaron que se llegó incluso a duplicar la capacidad específica de los pozos luego del procedimiento de limpieza. Sin embargo, no fue posible regresar a los valores históricos más altos que se habían reportado.



TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Antecedentes.....	8
1.2. Justificación	13
1.3. Objetivos.....	13
1.3.1. Objetivo General.....	13
1.3.2. Objetivos específicos.....	14
1.4. Alcance.....	14
1.5. Limitaciones.....	14
2. METODOLOGÍA	15
2.1. Marco metodológico.....	15
2.2. Conformación del equipo	15
2.3. Actividades realizadas	15
3. RESULTADOS.....	16
3.1. Especificación técnica utilizada para la limpieza química en Sand Box.....	16
3.1.1. Actividad 1: Inspección inicial	16
3.1.2. Actividad 2: Limpieza física y química del pozo	17
3.1.3. Actividad 3: Inspección final.....	21
3.1.4. Informe Técnico Final	21
3.2. Resultados de la implementación de la limpieza química en Sand Box	25
3.2.1. Actividad 1: Ejecución de la inspección inicial.....	25
3.2.2. Actividad 2: Ejecución de la limpieza física y química del pozo.....	27
3.2.3. Actividad 3: Ejecución de la inspección final	37
3.3. Lecciones aprendidas	38
4. CONCLUSIONES	43
5. RECOMENDACIONES	45
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
7. CONTROL DE CAMBIOS	49



8.	APÉNDICES	50
8.1.	Hoja de cálculo para uso de productos químicos.	50
8.2.	Zonificación hidroquímica	50
8.3.	Progresividad de incrustaciones	52
8.4.	Procedimientos para monitoreo del envejecimiento del pozo.....	53
8.5.	Procedimientos para rehabilitación con productos químicos (Houben y Treskatis, 2007) 55	
8.5.1.	Procesos para disolución para hierro y manganeso.....	55
8.5.2.	Oxidación o disolución de biomasa.....	57
8.5.3.	Remoción de remanentes de fluidos de perforación	57
8.6.	Aditivos para limpieza química.....	58
8.7.	Comparación del desempeño de productos para limpiezas químicas	60
8.8.	Otras recomendaciones para la ejecución de limpieza de pozos	62
9.	ANEXOS.....	64
14.1.	Perfil constructivo del pozo Sand Box 2 (N° 11-15)	64
14.2.	Perfil constructivo del pozo Sand Box 3 (N° 11-16)	64
14.3.	Fichas técnicas de los productos químicos.....	64
14.4.	Informe de filmación	64
14.5.	Informe de limpieza química.....	64
14.6.	Técnicas para monitoreo de envejecimiento de pozos (Houben y Treskatis, 2007) .64	

TABLA DE CUADROS

Cuadro 1	Relación entre productos de la asesoría y entregables definitivos	9
Cuadro 2	Participantes de la iniciativa 2020-106-29	15
Cuadro 3	Características de los productos químicos que se deben documentar como parte de la oferta.....	19
Cuadro 4	Hallazgos del proceso de filmación.....	25
Cuadro 5	Características de los productos químicos propuestos por el contratista.	31



Cuadro 6 Preparación y uso de productos químicos.	32
Cuadro 7 Hallazgos del proceso de limpieza física y química según lo planteado en cartel y lo ejecutado en campo.....	34
Cuadro A1. Porcentaje de reducción respecto a la capacidad específica original de un pozo, que se considera aceptable para ejecutar labores de mantenimiento para mejorar la productividad.	54
Cuadro A2. Constantes de disociación ácida para productos utilizados en rehabilitación de pozos.	56

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Cepillo utilizado para el ejercicio de limpieza	27
Figura 2. Pistón utilizado para el ejercicio de limpieza	28
Figura A1. Distribución vertical de zonas redox y sus especies indicadoras en agua subterránea.	50
Figura A2. Atascamiento progresivo de poros por incrustaciones	52
Figura A3. Grados de disolución obtenidos por medio de diferentes químicos sobre minerales sintéticos de óxido de hierro, poco cristalinos (ferrihidrita) y altamente cristalinos (goetita), luego de 7 horas.....	61



1. INTRODUCCIÓN

La iniciativa bajo análisis surge por la necesidad de la Región Huetar Caribe de lograr una recuperación de la productividad en el campo de pozos de Sand Box, específicamente aquellos denominados #2 y #3. Ambas obras proveen el agua que se trata en la planta potabilizadora de la zona, para abastecer aproximadamente 8500 habitantes del sector sur de la provincia de Limón. Este acueducto atiende sistemas que pasaron a ser administrados por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), además de algunos operados por Asociaciones Administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados (ASADA).

En fecha 26 de mayo del 2020, el señor José Matarrita Cortés (Región Huetar Caribe) solicita apoyo a la UEN Investigación y Desarrollo y a la UEN Administración de Proyectos para atender la problemática anteriormente expuesta. La solicitud de asesoría técnica ([2020-106-07](#)) se incluye el día 22 de junio del 2020 en la documentación del Sistema de Gestión de Calidad del Proceso de la UEN ID.

1.1. Antecedentes

La solicitud de asesoría técnica ([2020-106-07](#)) del presente caso incluía inicialmente cinco productos esperados por parte del cliente interno. Específicamente, se trataba de los siguientes:

- A. Identificar, caracterizar y presupuestar un procedimiento de limpieza para los pozos afectados por incrustaciones en Sand Box.
- B. Analizar la información del comportamiento dinámico y de producción de los pozos, para valorar la relación entre el comportamiento del ensuciamiento y el régimen de extracción.



- C. Plantear una estrategia de seguimiento piloto al pozo #5, según los criterios ya establecidos por la Región Huetar Caribe y la UEN Administración de Proyectos.
- D. Valorar los resultados obtenidos y proponer una estrategia operativa para mitigar o prevenir la colmatación de la rejilla (procedimiento para limpieza preventiva y correctiva).
- E. Proponer medidas de mitigación y alerta temprana para prevenir la colmatación de la rejilla en los pozos.

Durante las reuniones iniciales para comprender a profundidad la problemática, la Región Huetar Caribe manifestó la urgencia que tenía para formular y ejecutar una contratación de limpieza química para los pozos. Por ello, se reformularon los entregables de la asesoría, de tal manera que se atendiera en primera instancia la necesidad operativa. Esto, sin desatender los productos inicialmente acordados. La relación entre productos iniciales y entregables definitivos elaborados fue la que se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1 Relación entre productos de la asesoría y entregables definitivos


Productos según asesoría técnica	Entregable donde se contempla cada producto
Identificar, caracterizar y presupuestar un procedimiento de limpieza para los pozos afectados por incrustaciones en Sand Box.	<u>Entregable 1:</u> Estudio bibliográfico y de mercado. <u>Entregable 2:</u> Elaboración de cartel.
Analizar la información del comportamiento dinámico y de producción de los pozos, para valorar la relación entre el comportamiento del ensuciamiento y el régimen de extracción.	<u>Entregable 3:</u> Análisis de datos operativos de los pozos actuales.



Productos según asesoría técnica	Entregable donde se contempla cada producto
Plantear una estrategia de seguimiento piloto al pozo #5, según los criterios ya establecidos por la Región Huetar Caribe y la UEN Administración de Proyectos.	<u>Entregable 3:</u> Análisis de datos operativos de los pozos actuales. <u>Entregable 4:</u> Lecciones aprendidas y recomendaciones para limpieza química de pozos.
Valorar los resultados obtenidos y proponer una estrategia operativa para mitigar o prevenir la colmatación de la rejilla (procedimiento para limpieza preventiva y correctiva).	<u>Entregable 4:</u> Lecciones aprendidas y recomendaciones para limpieza química de pozos.
Proponer medidas de mitigación y alerta temprana para prevenir la colmatación de la rejilla en los pozos.	<u>Entregable 4:</u> Lecciones aprendidas y recomendaciones para limpieza química de pozos.

Referencia: Elaboración propia.

El primer entregable ([2020-106-11](#)) contempló un estudio bibliográfico que permitiera generar una base común de conocimiento para todas las partes involucradas en la presente iniciativa de investigación. En términos generales, se encontró que “(...) 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

	Formulario de Informe Técnico I+D+i		Página 11 de 66
	Fecha de entrega: 14 de mayo de 2021		N° de Versión: 01

(National Driller, 2004). Los principales microorganismos identificados son (Hacket & Lehr, 1985):

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

Adicionalmente, fue posible documentar que hay una amplia variedad de condiciones ambientales capaces de favorecer el crecimiento de bacterias procesadoras del hierro, tales como: potencial oxidación – reducción (ORP), potencial de hidrógeno (pH), intensidad reductiva, hierro ferroso disuelto, oxígeno disuelto, demanda química de oxígeno, temperatura y dióxido de carbono (Lazo, 2020a). Cada bacteria específica tiene sus condiciones de preferencia y esto también implica que la diversidad de microorganismos presente en cada caso podría ser muy amplia. De hecho, en la mayoría de los casos se prefiere identificar grupos de bacterias u otros microorganismos antes que buscar el nombre específico de cada miembro de estas poblaciones.

Seguidamente, el estudio bibliográfico también permitió recomendar algunos aspectos para el momento de contratar algún servicio de limpieza química. Específicamente, se indicó que para cada producto o grupo de productos se valore (Lazo, 2020a):


- *“Secuencia por utilizar: ácido inorgánico + ácido orgánico + desinfectante, o cualquier otra sustancia.*
- *Posibilidad de realizar un recuento de células de bacterias procesadoras de hierro en el pozo.*
- *Concentración por utilizar de cada producto.*
- *Cantidad por utilizar para cada producto.*
- *Forma de preparar el producto para ser aplicado al pozo.*



- *Forma de medir la concentración de cada producto en el pozo, o al menos para aproximar una buena aplicación.*
- *Tiempo de contacto por aplicar.*
- *Método para disposición final de residuos.*
- *Cantidad de repeticiones.*
- *Monitoreo previo y posterior de la capacidad específica.”*

Adicionalmente, se recomendó realizar un benchmarking con varias casas fabricantes, de tal manera que se pudiera examinar y comparar diferentes recomendaciones para buscar el mejor resultado posible. Todo lo anterior fue complementado por medio de la elaboración de una posible especificación técnica, tal y como consta en los documentos emitidos [2020-106-24](#) (estudio de mercado) y [2020-106-25](#) (especificación). A partir de estos últimos entregables se inició una discusión grupal con las partes interesadas en esta asesoría técnica, para poder depurar la especificación técnica a utilizar.

Con el fin de enriquecer la discusión, se realizó un análisis de los datos operativos históricos de los pozos 2 y 3 de Sand Box ([2020-106-39](#)). A partir del procesamiento de información (Lazo, 2020b) fue posible identificar que en el caso del pozo 2, en los meses de noviembre 2019 y entre marzo y mayo del 2020 se identificó una reducción en la proporción de caudales registrados mayores a 30 L/s (siendo lo ideal 45 L/s). Por otra parte, cabe destacar también que la franja de caudales registrados entre 0 y 20 L/s no pareció tener un incremento sostenido en su magnitud. No obstante, la franja de datos entre 21 y 30 L/s sí cambió de manera determinante, pasando de valores ubicados entre 8% y 16 %, hasta alcanzar entre un 50% y un 66% del total de registros de caudal. Esto fue una señal de alerta clara para la operación. El mismo comportamiento se pudo observar para el pozo 3, donde prácticamente el 90% de los registros de caudal se situaron entre 0 y 30 L/s.

	Formulario de Informe Técnico I+D+i		Página 13 de 66
	Fecha de entrega: 14 de mayo de 2021		N° de Versión: 01

En relación con los niveles de sumergencia de la sonda de cada pozo, el comportamiento de ambos pozos a lo largo del tiempo fue análogo al de los caudales registrados. Incluso se podría decir que la información documentada demostró un cambio sostenido en los niveles de sumergencia de la sonda de cada pozo. Esto fue un fenómeno claro desde el mes de octubre del año 2019 (Lazo, 2020b).

Por otra parte, desde el momento del arranque del sistema se observó una disminución sostenida de la capacidad específica. Se partió de un máximo alrededor en agosto del 2019, y posteriormente la productividad mostró una tendencia claramente decreciente, hasta valores menores que 2 [(L/s)/m]. La reducción global fue prácticamente de un 64% para pozo 2 y 78% para pozo 3.

De manera complementaria, es posible indicar que en el caso del pozo 2 la reducción promedio mensual de la capacidad específica se ubicó alrededor del 10%. Por otra parte, la reducción mensual promedio del pozo 3 es cercana al 15%. Según literatura técnica relacionada con el tema, una reducción de capacidad específica cercana a un 10% debería constituir una señal de alerta para el operador del sistema.

1.2. Justificación

El presente informe responde a la solicitud de asesoría técnica denominada: [2020-106-07](#).

1.3. Objetivos

En las secciones subsiguientes se presenta el objetivo general y los objetivos específicos.

1.3.1. Objetivo General

Documentar las lecciones aprendidas y eventuales recomendaciones para procedimientos para aplicar un procedimiento de limpieza química en pozos afectados por hierro y manganeso.



1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar los resultados del procedimiento de limpieza química implementado en Sand Box.
- Recopilar e interpretar las lecciones aprendidas del procedimiento de limpieza química aplicados en Sand Box.

1.4. Alcance

Este documento presenta el análisis de las acciones ejecutadas para realizar limpieza química en los pozos de Sand Box 2 y 3. Las recomendaciones emitidas se deben interpretar según las condiciones hidrogeológicas que existen en el sitio. Adicionalmente, se trata de la primera experiencia de AyA en donde se aplica limpieza química a un caso tan severo de afectación por depósitos de hierro y manganeso.

1.5. Limitaciones

En Costa Rica existe una oferta muy limitada de proveedores especializados en limpieza química de pozos para producción de agua para consumo humano, lo cual restringe la disponibilidad de oferentes. El hecho de que se requiera maquinaria especializada para acompañar la aplicación de productos químicos es un factor que impide que oferentes con mucho conocimiento científico puedan ofertar sus servicios. Además, es importante valorar el tiempo transcurrido entre la detección de las primeras señales de reducción de productividad en los pozos 2 y 3 y el momento en que se aplicó la limpieza. Este es un campo de pozos complejo, por la presencia de diversas perforaciones (muy cercanas entre sí) que se han venido implementando con el paso del tiempo.

Si bien se cuenta con el pozo 1, el cual podría ser aprovechado para realizar algún tipo de monitoreo (no está implementado), no se cuenta con piezómetros construidos en el sitio, específicamente para tratar de determinar la amplitud del fenómeno de reducción progresiva de la productividad de los pozos bajo estudio.



2. METODOLOGÍA

2.1. Marco metodológico

El estudio se basa en consulta de bibliografía especializada y un estudio de mercado a nivel nacional. Posteriormente, se utiliza el conocimiento adquirido a través del proceso de contratación de limpieza química para generar el entregable propiamente, con la debida discusión de las partes interesadas.

2.2. Conformación del equipo

Se cuenta con participación de la UEN Investigación y Desarrollo y la UEN Administración de Proyectos de la Subgerencia de Sistemas Delegados. Adicionalmente, el departamento de ingeniería de la ASADA Malinches de Pinilla lleva la coordinación del desarrollo del proyecto. Específicamente se cuenta con los participantes que se anotan en el cuadro 2.

Cuadro 2 Participantes de la iniciativa 2020-106-29

Nombre	Función	Área funcional donde labora
Andrés Lazo Páez	Elaborador	UEN Investigación y Desarrollo
José Matarrita Cortés	Elaborador	Región Huetar Caribe
Jeisson Cháves Gamboa	Elaborador	UEN Administración de Proyectos
Rafael Orozco Campos	Elaborador	UEN Investigación y Desarrollo
German Mora Rodríguez	Elaborador y revisor	UEN Investigación y Desarrollo

Referencia: Elaboración propia.

2.3. Actividades realizadas

Las actividades realizadas corresponden únicamente a trabajo de oficina y de campo descrito en la sección 2.1.



3. RESULTADOS

3.1. Especificación técnica utilizada para la limpieza química en Sand Box

Los trabajos que definieron como necesarios para poder contratar los trabajos de limpieza se dividieron en tres grandes actividades:

- Actividad 1: Inspección inicial.
- Actividad 2: Limpieza física y química.
- Actividad 3: Inspección final.

Se estableció como punto de partida la ejecución de una inspección con cámara de video, para revisar visualmente el estado actual y la conformación interna de cada pozo. Seguidamente, como parte de la actividad 2 se especificó propiamente la etapa de limpieza física y química. Una vez finalizada la limpieza, se determinó la necesidad de una nueva inspección con cámara de video que permitiera reconocer de forma visual el efecto de la limpieza efectuada.

3.1.1. Actividad 1: Inspección inicial

Esta etapa tuvo como finalidad la obtención de un registro visual del pozo, de tal forma que se pudieran verificar el estado y las características de este. Adicionalmente, esta filmación fue utilizada como parámetro comparativo de los resultados de la limpieza. Se solicitó al contratista el uso de algún producto coagulante o floculante apto para agua potable, con el fin de lograr la mejor visualización posible de las condiciones de la infraestructura. Con base en el video, se solicitó al contratista determinar al menos lo siguiente:

- Condiciones internas del pozo.
- Registro de la tubería (determinación del perfil constructivo).
- Registro de las uniones donde se determine el estado de cada una de ellas.



- Inicio y final de las secciones ranuradas.
- Estado de limpieza de las secciones ranuradas.
- Fondo actual del pozo.
- Cualquier componente que pueda afectar la correcta operación del pozo.

3.1.2. Actividad 2: Limpieza física y química del pozo


Una vez aclarado que el pozo se encuentra construido en tubería PVC, se especificó cada proceso a ejecutar para la actividad 2:

a) Cepillado

Se solicitó el uso de un cepillo con cerdas de nylon con diámetro externo igual al diámetro externo de la tubería de armado del pozo, con el fin de asegurar una adecuada limpieza de la pared de la tubería. Se solicitó emplear el cepillado en toda la sección sumergida en agua, abarcando tanto la tubería ciega como la tubería de rejilla. Específicamente, se definió como alcance principal de esta labor la remoción las partículas, parte de las incrustaciones minerales y parte de los depósitos de bacterias, que por su disposición pueden ser desplazadas por medio del cepillado. Lo anterior con la finalidad de generar una limpieza inicial y un contacto mayor con los productos químicos especializados para este tipo de remoción de incrustaciones.

b) Agitación

Se solicitó el uso de un pistón construido con materiales de polietileno o hule alternados con trozos de madera (separadores) de forma circular. El material de polietileno o hule del pistón se pidió con un diámetro externo de 1/2" menos con respecto al diámetro interno de la tubería de armado de PVC. Los separadores del pistón se especificaron con un diámetro de 2" menos que diámetro interno del pozo. Con este accesorio se buscó que un movimiento vertical del pistón impulsara todos los productos

	Formulario de Informe Técnico I+D+i		Página 18 de 66
	Fecha de entrega: 14 de mayo de 2021		N° de Versión: 01

aplicados para que penetren la rejilla, el empaque de grava y la formación geológica circundante.

La duración mínima del proceso mecánico de agitación se estableció para 12 horas continuas, o en su defecto para el tiempo que sea necesario. Un criterio empleado para guiar al contratista consistió en tratar de obtener una tasa de ingreso de arenas al pozo (sedimentación) máxima de 30 cm por dos horas de agitación, sin dejar de lado la recomendación del proveedor de productos químicos para limpieza. Paralelamente al proceso de agitación, se solicitó extraer los materiales sedimentados en el fondo del pozo.

c) Extracción de sólidos sedimentados

Para una correcta extracción de los sólidos sedimentados dentro del pozo, se pidió realizar un vaciado del pozo por medio de la herramienta conocida como “air lift”, empleando aire a una presión de flujo de 150 psi. El procedimiento se debía realizar hasta que el agua extraída del pozo sea cristalina.

d) Limpieza química

Este proceso consistió en la aplicación de un protocolo de limpieza que contemplara algunos de los productos indicados en el cuadro 3. Se solicitó considerar al menos los siguientes tipos de productos: ácido orgánico, ácido inorgánico, dispersante y bactericida. Como objetivo de esta sección se planteó el ataque a las posibles colonias de bacterias existentes dentro del pozo. También se amplió la variedad de productos permitidos para la limpieza a otros tipos de sustancias, tales como: bases, agentes quelantes y surfactantes.

En el caso particular de los agentes oxidantes fuertes como lo son algunos agentes bactericidas (cloro, peróxido de hidrógeno, hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio, etc.) se permitió su uso solamente al final del procedimiento de limpieza, con el fin de evitar

condiciones electroquímicas que impulsaran la formación contraproducente de óxidos que nuevamente pudieran precipitar sobre las superficies internas de los pozos.

Se pidió emplear productos especializados con sustancias inhibidoras o humectantes, que eviten tasas desmedidas de corrosión en el interior del pozo; esta característica se deberá consignar en la oferta. Esto último aplicable para productos que tengan características corrosivas como parte de su naturaleza química. Además, se estableció la premisa de que en ambos pozos los depósitos se componían mayoritariamente de metales como el hierro en forma de óxidos e hidróxidos, y de biopelícula formada por bacterias.

Cuadro 3 Características de los productos químicos que se deben documentar como parte de la oferta.

Nombre comercial	Marca	Tipo de producto	pH	Ingredientes activos	N° CAS
Indica el nombre comercial	Indica la marca	Selecciona e indica el tipo de producto: - Ácido orgánico - Ácido inorgánico - Base - Polímero dispersante - Surfactante aniónico - Otro (especificar)	Indica el pH del producto	Indica los ingredientes activos presentes en el producto, según la hoja de seguridad aportada, y sus respectivas concentraciones. Debe indicar el contenido de agentes humectantes o inhibidores de corrosión.	Indica el número CAS (<i>Chemical Abstracts Service</i>) para identificación de cada ingrediente activo.

Referencia: Elaboración propia.

Además de la información indicada en el cuadro 3, para cada producto químico propuesto se solicitó aportar como parte de la oferta lo siguiente:

1. Procedimiento de preparación del producto, para su posterior aplicación.
2. Secuencia de aplicación de los productos.



3. Requerimiento de cepillado o agitación, acompañado del tiempo necesario para ello. Esto para la correcta distribución de los productos químicos adicionados en el medio acuoso y la formación geológica circundante.
4. Parámetro operativo que se debe medir en campo para garantizar la óptima aplicación. Por ejemplo, en caso de tratarse de un ácido, se deberá indicar el valor de pH que se debe mantener durante toda la aplicación. Asimismo, el contratista estará a cargo de realizar las mediciones respectivas durante todo el contrato.
5. Estrategia propuesta para captura, neutralización y tratamiento necesario para los efluentes derivados de la aplicación de cada producto, previo a su vertido. Todos los vertidos provenientes de la limpieza química deben ser tratados acorde con el marco legal vigente para vertido de aguas residuales.
6. Ficha técnica del producto donde se detalle su uso recomendado.
7. Hoja de seguridad del producto, donde se detalle su composición química.
8. Prueba de que el producto cumple con la norma NSF/ANSI Standard 60. Se debe aportar un certificado que permita demostrar que el producto ofertado cumple con la norma NSF/ANSI Standard 60 o en su defecto la norma equivalente, emitido por un organismo de evaluación de conformidad acreditado por el Ente Costarricense de Acreditación (ECA) o con el respectivo reconocimiento, tal como se establece en el artículo 34 de la ley del Sistema Nacional de la Calidad (SNC). El AyA se reservará la potestad de verificar la información aportada en el sitio web de la organización indicada.
9. Lista de los equipos y herramientas, así como toda la información técnica que compruebe y valide las características de los equipos a utilizar en las labores de ejecución del contrato. Listado de las bombas, plantas eléctricas, compresores de aire, materiales químicos y demás insumos requeridos para la labor.



e) Orden para la ejecución de los procesos

Una vez descritos cada uno de los procesos que deberán de ser realizados en el pozo, se procedió a indicar el orden de ejecución y los tiempos establecidos para cada uno de ellos:


- Cepillado, tiempo de ejecución: 6 horas efectivas
- Agitación, tiempo de ejecución: 12 horas efectivas o hasta que se obtenga una taza de sedimentación de 30 cm por cada 2 horas de agitación.
- Extracción de sólidos sedimentados: tiempo de aplicación 1 hora
- Limpieza química, tiempo de aplicación del procedimiento: 24 horas máximo
- Agitación, tiempo de ejecución 12 horas o hasta que se obtenga una taza de sedimentación de 30 cm por cada 2 horas de agitación.
- Extracción de sólidos sedimentados: tiempo de aplicación 1 hora

3.1.3. Actividad 3: Inspección final

Esta actividad consistió en la repetición de la filmación de cada pozo. En caso de que se detectaran indicios de un mal desarrollo y limpieza (presencia de biopelícula o depósitos evidentes de hierro y manganeso) en las zonas “objetivo” acordadas durante la actividad 1, el contratista debía repetir los procedimientos ofertados, hasta cumplir con este punto, sin incurrir en gasto para el AyA y todo dentro del plazo establecido.

3.1.4. Informe Técnico Final

De manera complementaria, se solicitó al contratista la presentación de un informe técnico consolidado, en el cual incluyera la descripción, ejecución, análisis de resultados y discusión de estos, para cada una de las actividades desarrolladas para cada uno de

	Formulario de Informe Técnico I+D+i		Página 22 de 66
	Fecha de entrega: 14 de mayo de 2021		N° de Versión: 01

los pozos intervenidos. El Informe Técnico, debía contar como mínimo con los siguientes apartados:

- Portada.
- Nota de responsabilidad profesional, con la firma respectiva de cada profesional involucrado.
- Introducción.
- Descripción de los detalles del pozo.
- Metodología y fundamentación técnica de la evaluación de cada etapa.
- Detalle de los equipos empleados para la ejecución de las pruebas.
- Determinación de las condiciones iniciales de cada pozo:
 - El estado físico del pozo al momento de iniciar la ejecución del contrato, aportando fotografías que muestren las condiciones previas del pozo antes de ejecutar el proceso de limpieza.
 - Incluir el detalle de las labores de campo realizadas de previo, durante y una vez finalizada la filmación.
 - Análisis y evaluación de resultados: establecimiento de las condiciones física del pozo, particularmente las secciones de tuberías de rejillas.
- Proceso de limpieza química, debidamente firmado por el profesional responsable en química o ingeniería química:
 - Procedimiento de preparación del producto, para su posterior aplicación.
 - Secuencia de aplicación de los productos.
 - Requerimiento de cepillado o agitación, acompañado del tiempo necesario para ello. Esto para la correcta distribución de los productos



químicos adicionados en el medio acuoso y la formación geológica circundante.

- Parámetro operativo que se debe medir en campo para garantizar la óptima aplicación. Por ejemplo, en caso de tratarse de un ácido, se deberá indicar el valor de pH que se debe mantener durante toda la aplicación. Asimismo, el contratista estará a cargo de realizar las mediciones respectivas durante todo el contrato.
- Estrategia propuesta para captura, neutralización y tratamiento necesario para los efluentes derivados de la aplicación de cada producto, previo a su vertido. Todos los vertidos provenientes de la limpieza química deben ser tratados acorde con el marco legal vigente para vertido de aguas residuales.
- Ficha técnica del producto donde se detalle su uso recomendado.
- Hoja de seguridad del producto, donde se detalle su composición química.
- Prueba de que el producto cumple con la norma NSF/ANSI Standard 60. Se debe aportar un certificado que permita demostrar que el producto ofertado cumple con la norma NSF/ANSI Standard 60 o en su defecto la norma equivalente, emitido por un organismo de evaluación de conformidad acreditado por el Ente Costarricense de Acreditación (ECA) o con el respectivo reconocimiento, tal como se establece en el artículo 34 de la ley del Sistema Nacional de la Calidad (SNC). El AyA se reservará la potestad de verificar la información aportada en el sitio web de la organización indicada.
- Lista de los equipos y herramientas, así como toda la información técnica que compruebe y valide las características de los equipos a utilizar en las labores de ejecución del contrato. Listado de las bombas,



plantas eléctricas, compresores de aire, materiales químicos y demás insumos requeridos para la labor.

- Detalle de los procedimientos a seguir para realizar mantenimiento preventivo de los pozos (y su frecuencia de aplicación), incluyendo posible consumo de productos químicos para este propósito. Debe considerar el uso del by-pass para recirculado de químicos.
- Determinación de las condiciones resultados de la limpieza:
 - El estado físico del pozo después de la ejecución de la Actividad 3, aportando fotografías que muestren las condiciones resultados del pozo después de ejecutar el proceso de limpieza, discutir los resultados obtenidos y establecer el grado de limpieza obtenido.
 - Incluir el detalle de las labores de campo realizadas de previo, durante y una vez finalizada la filmación del pozo
 - Análisis de los resultados obtenidos a partir de la limpieza y desarrollo, mostrando fotografías comparativas.
- Conclusiones y recomendaciones: establecer las conclusiones de los resultados obtenidos, a partir de la comparación de las filmaciones pre y posterior a la filmación.
- Anexos.

De manera complementaria, es importante anotar que se incluyó en el cartel de contratación el requerimiento de un profesional en química o ingeniería química para la supervisión de las labores. Esto por cuanto se busca contar con una interpretación de las condiciones de proceso aplicadas. El AyA busca capitalizar conocimiento que pueda ser empleado para mejorar las condiciones de operación y mantenimiento de sus sistemas.



3.2. Resultados de la implementación de la limpieza química en Sand Box

Para la implementación de la limpieza química se adjudicó a la empresa Hidrotica, por un monto cercano a ¢ 10 000 000, y se acordó el inicio de labores para el día 29 de noviembre del 2020. Con el fin de detallar todo lo actuado, en las secciones subsiguientes se anotan los principales aportes identificados para el quehacer institucional.

3.2.1. Actividad 1: Ejecución de la inspección inicial

Con base en las observaciones realizadas por medio de cámara de video, el contratista informó lo indicado en el cuadro 4. Los datos tabulados indicaron que existía un evidente ensuciamiento en la sección interna de cada pozo; esto hizo presumir que la condición también existe en la geología circundante, lo cual no se pudo cuantificar por no contar con la infraestructura necesaria para ello. Prácticamente un 40% del área total de rejillas mostraba un ensuciamiento crítico (pozo 3).

Cuadro 4 Hallazgos del proceso de filmación.

Criterio	Pozo 2	Pozo 3
Fecha de inicio de la intervención	03/12/2020	29/11/2020
Fecha de inspección final	06/12/2020	03/12/2020
Condiciones internas	Inspección inicial Visibilidad intermedia. Inspección final Ligera presencia de sólidos en suspensión, similares a los producidos por aplicación de floculante.	Inspección inicial Baja visibilidad, incluso con la aplicación de floculante. Inspección final Ligera presencia de sólidos en suspensión, similares a los producidos por aplicación de floculante.
Validación del perfil constructivo	Coincide mayoritariamente con el perfil constructivo original. Existen muy ligeras diferencias con el inicio de la rejilla ranurada (< 2 m).	Coincide mayoritariamente con el perfil constructivo original. Existen muy ligeras diferencias con el inicio de la rejilla ranurada (< 2 m).



Critero	Pozo 2	Pozo 3
	Además, el fondo visible se documentó en la filmación a una profundidad menor (diferencia 2.3 m).	Además, el fondo visible se documentó en la filmación a una profundidad menor (diferencia 1.4 m).
Registro de uniones y su estado	No lo indica Alpízar (2020).	No lo indica Alpízar (2020).
Inicio y final de secciones ranuradas	24.9 m hasta 37.8 m.	24.7 m hasta 38.6 m.
Estado de limpieza de sección ranurada	Ensuciamiento hasta los 32 m (totalmente cerradas).	Ensuciamiento hasta los 32 m (totalmente cerradas).
Fondo del pozo	Lleno con material (40.6 m hasta 41 m).	Lleno con material (38.8 m hasta 40 m).
Resultado aparente de limpieza	<p>Sección interna: rejillas limpias con ligeras trazas de sedimento en algunas pocas secciones.</p> <p>Caudal Anterior: 20 L/s Luego de limpieza: 27 L/s % variación: +35%</p> <p>Abatimiento luego de limpieza: 10 m.</p> <p>Capacidad específica <u>Pozo nuevo:</u> 13.2 [(L/s)/m] <u>Antes de limpieza:</u> 1.44 [(L/s)/m] <u>Luego de limpieza:</u> 2.7 [(L/s)/m] % variación limpieza: +87% % del valor original: 20%</p> <p>Variación temporal de calidad de agua</p> <p>Manganeso: 0% respecto a promedio habitual.</p> <p>Hierro: +55% respecto a promedio habitual.</p> <p>Variación en nivel estático</p>	<p>Sección interna: rejillas limpias con ligeras trazas de sedimento en algunas pocas secciones.</p> <p>Caudal Anterior: 9 L/s Luego de limpieza: 16 L/s % variación: +78%</p> <p>Abatimiento luego de limpieza: 25 m.</p> <p>Capacidad específica <u>Pozo nuevo:</u> 29.8 [(L/s)/m] <u>Antes de limpieza:</u> 0.78 [(L/s)/m] <u>Luego de limpieza:</u> 0.64 [(L/s)/m] % variación limpieza: -18% % del valor original: 12%</p> <p>Variación temporal de calidad de agua</p> <p>Manganeso: 0% respecto a promedio habitual.</p> <p>Hierro: +55% respecto a promedio habitual.</p> <p>Variación en nivel estático</p>

Criterio	Pozo 2	Pozo 3
	Anterior: 8.2 m Luego de limpieza: 9.3 m	Anterior: 8.9 m Luego de limpieza: 8.7 m

Referencia: Elaboración propia con datos de Alpizar (2020).

3.2.2. Actividad 2: Ejecución de la limpieza física y química del pozo

En el presente apartado se analizaron cuáles fueron las condiciones solicitadas en la contratación, y se confrontaron con lo actuado por parte del contratista. Con ello se buscó identificar oportunidades de mejora en futuros procesos de rehabilitación de pozos. También se plantearon algunas respuestas a temas técnicos que fueron implementados por vez primera a nivel de la institución.

El cepillado se realizó según lo solicitado en el cartel de contratación. En la figura 1 se muestra el elemento de fabricación casera que empleó la empresa Hidrotica. Se cumplieron con las dimensiones apropiadas para el armado de los pozos en cuestión. Propiamente los tiempos de aplicación de cepillado se analizan más adelante, al momento de estudiar el protocolo de limpieza química. Esta etapa permitió realizar un desprendimiento parcial de los depósitos encontrados en el interior de cada pozo; esto se pudo evidenciar con la apariencia del agua, la gran cantidad de sólidos suspendidos presente, y la calidad del agua (concentraciones altas de hierro y manganeso).

Figura 1. Cepillo utilizado para el ejercicio de limpieza



Referencia: imagen propia de elementos de la empresa Hidrotica.

En el caso de la agitación, se utilizó el elemento que se ilustra en la figura 2. De igual manera se cumplieron con las dimensiones apropiadas para el armado de los pozos en cuestión. Propiamente los tiempos de aplicación de agitación se analizan más adelante, al momento de estudiar el protocolo de limpieza química. El trabajo realizado con este elemento es uno de los más determinantes en la rehabilitación del pozo, pues es el que permite distribuir los productos químicos dentro del pozo y en el medio geológico circundante. Con la infraestructura disponible en sitio no fue posible determinar el alcance de la circulación de los productos químicos alrededor de cada pozo; sin embargo, es posible afirmar que no se encontraron variaciones de pH o sólidos disueltos en pozos circundantes.

Figura 2. Pistón utilizado para el ejercicio de limpieza



Referencia: imagen propia de elementos de la empresa Hidrotica.

Para la extracción de los sólidos sedimentados dentro del pozo, se instaló un sistema “air-lift” empleando aire generado por medio de un compresor. La herramienta fue altamente efectiva, e incluso se encontró que el sistema instalado contaba con capacidad superior a lo requerido por el sistema. Se tuvieron que realizar los ajustes del caso.



Previo a iniciar con el análisis detallado de lo actuado en el tema de limpieza química, es importante resaltar que algunos autores sugieren considerar algunos aspectos relacionados con limpieza química. Entre los principales asuntos destacables, se encontró lo siguiente (Smith, 2016):

- Es recomendable emplear productos listados bajo el estándar NSF-60 u otro equivalente.
- No todos los crecimientos bacterianos se eliminan con el uso de cloro; no es posible “esterilizar” un acuífero o un pozo. Incluso, algunos microorganismos podrían llegar a adaptar a condiciones oxidantes. Es probable que la zona de “atascamiento” se reestablezca fuera del radio de influencia de la limpieza e incluso se podrían generar sub-productos de la desinfección.
- Ácidos orgánicos quelantes, tal como el ácido glicólico, tienen un efecto antibacterial (sobre biopelícula y microflora) al mismo tiempo que sirve para remover productos oxidados del hierro. Aunque la microflora no es fuertemente atacada por este agente químico, sus productos que “atascan” el medio circundante pueden ser removidos de manera eficiente. Este producto también es capaz de remover incrustaciones de aguas duras (calcio, magnesio, manganeso y otras sales) así como depósitos de hierro y algunos polisacáridos (biopelícula bacteriana). Es muy seguro de manejar, incluso en sus formas más concentradas. Otros ácidos orgánicos como el oxálico también son efectivos, pero pueden ser afectados por ciertas composiciones químicas del agua. Por ejemplo, el ácido oxálico es poco eficiente en aguas duras.
- Algunos ácidos inorgánicos como el ácido sulfámico (usualmente un sólido) son poco efectivos contra las sales de carbonato y son débiles para mitigar problemas por presencia de óxidos de hierro. Típicamente se emplea como un intensificador de otros ácidos, por lo que se combina con la familia de ácidos orgánicos.



- Existen mezclas de sustancias químicas “famosas” por su eficiencia en limpieza y rehabilitación de pozos. Los ejemplos más típicos son: ácido glicólico + ácido clorhídrico o ácido glicólico + ácido sulfámico. Muchas de estas mezclas contienen polímeros surfactantes o dispersantes.
- Algunos químicos empleados en rehabilitación de pozos se basan en ácidos que contienen fósforo, los cuales son más económicos que las familias libres de este nutriente. Cuando se emplean productos con fósforo, un remanente de este elemento puede quedar en los minerales del suelo o en algún depósito de hierro o manganeso, y podría llegar a constituir un nutriente útil para el crecimiento bacteriano (no deseado) en el medio geológico. Esta misma situación aplica a otros agentes surfactantes y quelantes empleados en estas labores, para remover el material desprendido de las incrustaciones.

El oferente especificó los productos químicos que se presentan en el cuadro 5. Como parte de la columna denominada “tipo de producto” se anotó tanto la clasificación solicitada por el cartel de compra como el aporte adicional brindado por la empresa privada (ver fichas técnicas en el anexo 9.3). Cabe resaltar que no se especificaron: productos bactericidas, bases u otros agentes complementarios.

No se indicó de manera explícita por parte del contratista si alguno de los productos contaba con agentes humectantes o inhibidores de corrosión en su formulación. Sin embargo, a partir de la formulación de los productos es posible suponer que tanto el ácido hidroxiacético (glicólico, Aqua Clear AE) como el dietilenglicol presente en el AQF-2 podrían cumplir esta función. Por otra parte, el cloruro de sodio es un agente que funciona como intensificador de la acción limpiadora que se desea ejercer.



Cuadro 5 Características de los productos químicos propuestos por el contratista.

Nombre comercial	Marca	Tipo de producto	pH	Ingredientes activos	N° CAS
Aqua Clear AE	Halliburton	Ácido orgánico "Intensificador ácido / Anti-incrustante"	1.1	Ácido hidroxiaacético 30-60%	79-14-1
AQF-2 Foaming Agent	Halliburton	Agente espumante	6.5 – 8.5	Alfa olefina sulfonato de sodio 30-60% Éter monobutílico de etilenglicol 10-30% Dietilenglicol 5-10%	68439-57-6 111-76-2 111-46-6
Aqua Clear MGA	Halliburton	Ácido inorgánico "Ácido granular inhibido / Desincrustante"	1.6	Ácido sulfámico 60-100% Cloruro de sodio 10-30%	5329-14-6 7647-14-5
Aqua Clear PFD	Halliburton	Polímero dispersante "Polímero líquido dispersante concentrado libre de fósforo"	6.5 – 7.5	Poliacrilamida aniónica 60-100%	9003-05-8

Referencia: Elaboración propia.

El uso de los productos depende fuertemente de las indicaciones del fabricante, y está relacionada con la función que cumple cada uno. Asimismo, el parámetro a medir en campo para la correcta aplicación de productos depende de la naturaleza del ingrediente



activo y otras sustancias. En el cuadro 6 se presenta un resumen de estas particularidades.

Cuadro 6 Preparación y uso de productos químicos.

Nombre comercial	Función	Preparación recomendada y uso	Parámetro para seguimiento
Aqua Clear AE	Remover biomasa Limpiar rejillas	<p>Puede ser combinado o no con Aqua Clear MGA.</p> <p>178 – 355 mL de producto por litro de agua.</p> <p>Se calcula el volumen de agua en el intervalo ranurado y se duplica el cálculo de volumen para tener en cuenta el agua en la zona engravada y la interfase con la formación.</p> <p>Aplicar a rejilla y pistonear por 20-30 min. Luego dejar reposar 2 h y repetir la actividad hasta completar 24 h.</p> <p>Bombear el pozo para purgar 23 veces el volumen de este, y hasta que el pH presente 0.5 unidades de diferencia respecto al valor original.</p>	pH, sólidos disueltos
AQF-2 Foaming Agent	Aumenta capacidad para levantar grandes volúmenes de agua. Mejora capacidad de limpieza con corriente de aire. Reduce tendencias pegajosas de las arcillas húmedas. Reduce requerimiento en volumen de aire.	<p>Se agrega al agua de inyección.</p> <p>0-5% – 2% por volumen.</p> <p>5 L – 20 L por cada metro cúbico.</p>	Sólidos disueltos



Nombre comercial	Función	Preparación recomendada y uso	Parámetro para seguimiento
Aqua Clear MGA	<p>Dispersa deposiciones e incrustaciones.</p> <p>Remueve deposiciones e incrustaciones de rejillas.</p>	<p>Puede ser combinado o no con Aqua Clear AE.</p> <p>0.06 – 0.12 kg de producto por litro de agua.</p> <p>Se calcula el volumen de agua en el intervalo ranurado y se duplica el cálculo de volumen para tener en cuenta el agua en la zona engravada y la interfase con la formación.</p> <p>Aplicar a rejilla y pistonear por 20-30 min. Luego dejar reposar 2 h y repetir la actividad hasta completar 24 h.</p> <p>Bombear el pozo hasta que el pH presente 0.5 unidades de diferencia respecto al valor original.</p>	pH, sólidos disueltos
Aqua Clear PFD	<p>Dispersa lodos, sedientos y arcillas de las formaciones productoras y engravadas en el intervalo ranurado del encamisado.</p> <p>Se emplea previo a la filmación.</p>	<p>Se calcula el volumen de agua en el intervalo ranurado y se duplica el cálculo de volumen para tener en cuenta el agua en la zona engravada y la interfase con la formación. También se puede determinar el volumen estático de agua y agregar 50% de exceso.</p> <p>El volumen de producto por agregar se determina considerando 2 litros de producto por m³ de agua.</p> <p>Aplicar a rejilla y pistonear por 20-30 min. Luego dejar reposar 2 h y repetir la actividad hasta completar 24 h.</p> <p>Bombear el pozo hasta que la turbiedad desaparezca.</p>	Sólidos disueltos y turbiedad

Referencia: Elaboración propia.

En este punto es importante anotar que se realizó una selección acorde con los mejores productos disponibles en el mercado. Es decir, se consideraron sustancias



químicas específicas para el problema previamente documentado, las cuales permitieron realizar la limpieza sin afectar significativamente los componentes del pozo. Ahora bien, el uso de los productos no necesariamente es secuencial, sino que hay algunos que se combinan para mejorar su efecto final. En el cuadro 7 se refleja tanto el uso de productos como el tiempo de exposición de cada pozo a las diferentes maniobras hidráulicas.

Cuadro 7 Hallazgos del proceso de limpieza física y química según lo planteado en cartel y lo ejecutado en campo

Criterio	Pozo 2	Pozo 3	Productos agregados
Filmación	-	-	PFD
Cepillado	<p>Tiempo proyectado: 6 h</p> <p>Tiempo ejecutado:</p> <p>Cepillado inicial: 4 h Carga de químico: -- Cepillado intermedio: 4 h Pausa y contacto: 1 h Cepillado final: 4 h Carga de químico: -- Pausa y contacto: 1 h</p> <p>Total: 14 h</p>	<p>Tiempo proyectado: 6 h</p> <p>Tiempo ejecutado:</p> <p>Cepillado inicial: 4 h Carga de químico: -- Cepillado intermedio: 4 h Pausa y contacto: 1 h Cepillado final: 4 h Carga de químico: -- Pausa y contacto: 1 h</p> <p>Total: 14 h</p>	AE + MGA
Agitación	<p>Tiempo proyectado: 12 h</p> <p>Tiempo ejecutado:</p> <p>Agitación 1: 4 h Pausa y contacto: 2 h Agitación 2: 4 h Pausa y contacto: 2 h Agitación 3: 4 h Pausa y contacto: 2 h Agitación 4: 4 h Pausa y contacto: 2 h Agitación 5: 4 h Pausa y contacto: 2 h Agitación 6: 4 h Pausa y contacto: 2 h Carga de químico: -- Agitación 7: 4 h</p>	<p>Tiempo proyectado: 12 h</p> <p>Tiempo ejecutado:</p> <p>Agitación 1: 3 h Pausa y contacto: 2 h Agitación 2: 4 h Pausa y contacto: 2 h Agitación 3: 3 h Pausa y contacto: 2 h Agitación 4: 4 h Pausa y contacto: 2 h Agitación 5: 3 h Pausa y contacto: 2 h Agitación 6: 4 h Pausa y contacto: 2 h</p> <p>Total: 33 h</p>	Ninguno




Critero	Pozo 2	Pozo 3	Productos agregados
	Pausa y contacto: 2 h Total: 42 h		
Extracción de sólidos sedimentados	Tiempo proyectado: 1 h Tiempo ejecutado: Adición espumante: -- Air-lift: 4 h Total: 4 h	Tiempo proyectado: 1 h Tiempo ejecutado: Adición espumante: -- Air-lift: 4 h Total: 4 h	AQF-2
Limpieza química	Tiempo proyectado: 24 h Ver secciones de cepillado y agitación.	Tiempo proyectado: 24 h Ver secciones de cepillado y agitación.	-
Agitación	Tiempo proyectado: 12 h Ver secciones de cepillado y agitación.	Tiempo proyectado: 12 h Ver secciones de cepillado y agitación.	
Extracción de sólidos sedimentados	Tiempo proyectado: 1 h Ver sección de extracción de sólidos sedimentados.	Tiempo proyectado: 1 h Ver sección de extracción de sólidos sedimentados.	-

Referencia: Elaboración propia.

En términos generales el cepillado mecánico de ambos casos transcurrió sin mayor problema, al igual que la agitación posterior a éste. Desde esta etapa inicial de cepillado se empezó a agregar la mezcla de los productos químicos MGA y AE, cuya acción conjunta tiene un mejor efecto (según lo indicado por el fabricante). La agitación como tal, solamente cumplió la función de dispersión de las sustancias en el interior del pozo y la formación geológica circundante. En términos totales de aplicación de productos, el pozo 2 fue intervenido por 60 horas (sin contar extracción e instalación de equipo de bombeo), mientras que en el caso del pozo 3 la intervención fue por un lapso de 51 h.

El pozo 3 fue el primero que se trabajó, por lo que también fue el que permitió obtener una impresión inicial de los resultados de los trabajos. Luego de la extracción de sedimentos, se pudo observar una mejora en la condición de ensuciamiento interno. No


	Formulario de Informe Técnico I+D+i		Página 36 de 66
	Fecha de entrega: 14 de mayo de 2021	N° de Versión: 01	

obstante, si bien se obtuvo un incremento del 78% en el caudal luego de la limpieza (cuadro 3), la productividad propiamente bajó casi en un 20%. Esto se debió a que luego de la limpieza el abatimiento del pozo fue superior al que se tenía anteriormente. De lo consultado en literatura, existe alguna probabilidad de que se haya podido mejorar la condición de flujo en el área inmediata al pozo 3; sin embargo, podría existir un “atascamiento” en un radio mayor al del área de influencia del procedimiento de limpieza.

Durante la limpieza del pozo 3, se observó que el nivel de sólidos disueltos varió desde un máximo de 1400 mg/L hasta un mínimo cercano a 200 mg/L, donde ya se estabilizó la lectura. Esto representa la presencia de los ácidos en el medio acuoso, donde probablemente se va consumiendo y diluyendo parte de estos. La estabilidad se alcanzó luego de aproximadamente 16 horas; esto corresponde a algún momento que se puede localizar luego del cepillado y en las primeras horas de agitación. El pH alcanzó su estabilidad (cerca del valor original del pozo) luego de 25 horas (durante la agitación); es decir, se pudo interpretar que el pH funcionó como un indicador más claro de la presencia de los productos químicos.

Para el pozo 2, se decidió incrementar el tiempo de agitación y se añadió una carga adicional de productos químicos. Como resultado, se observó que el caudal se incrementó en un 35% y la productividad creció 87%. En este caso el cambio en abatimiento no fue tan determinante como en el pozo 3. Probablemente eso permitió contar con una mejor productividad luego de la limpieza. Es importante anotar que, si bien la productividad pareciera haber crecido en gran medida, el marcado incremento se debe a la magnitud de la capacidad específica antes de la limpieza, la cual correspondía a un valor muy bajo (1.44 [(L/s)/m]).

Durante la limpieza del pozo 2, se observó que el nivel de sólidos disueltos varió desde un máximo de 1500 mg/L hasta un mínimo cercano a 200 mg/L, donde ya se estabilizó la lectura. Esto representa la presencia de los ácidos en el medio acuoso, donde probablemente se va consumiendo y diluyendo parte de estos. La estabilidad se alcanzó

	Formulario de Informe Técnico I+D+i		Página 37 de 66
	Fecha de entrega: 14 de mayo de 2021		N° de Versión: 01

luego de aproximadamente 30 horas (más que en el pozo 3). En este punto, debido a que el pH había retornado a su valor original, se agregó más producto químico; con ello, el pH se volvió a estabilizar en menos de 10 horas.


El pH en el pozo 2 alcanzó su estabilidad (cerca del valor original del pozo) luego de 35 horas (durante la agitación); es decir, se pudo interpretar que el pH en este caso también funcionó como un indicador más claro de la presencia de los productos químicos. Debido a que en el pozo 2 no se llegó a obtener por lo menos unos 30 L/s con la doble carga de producto químico y la agitación extendida, se decidió no realizar una nueva etapa de agitación con productos químicos en el pozo 3. Ante las condiciones hidrogeológicas identificadas, no se observó potencial de poder llegar a obtener una mejora “adicional” que fuera sustantiva.

3.2.3. Actividad 3: Ejecución de la inspección final

Al realizar la filmación final de cada pozo, se pudo obtener buena visibilidad en su interior. De hecho, la claridad fue de tal magnitud, que se observó claramente el fondo de cada pozo e incluso se pudo apreciar sin dificultad el empaque de grava que recubre las rejillas. Estas últimas, también mostraron ausencia total de depósitos.

Los resultados de productividad que se mostraron en el cuadro 3, demostraron que se tomó la decisión correcta al momento de formular el cartel de contratación. En algún momento se valoró incluir una meta de “recuperación” luego de la limpieza para el parámetro de capacidad específica; sin embargo, no se contaban con datos hidrogeológicos confiables que permitieran establecer cuál debía ser la meta. Por ello se optó por hacer una valoración visual a nivel del contrato para que AyA posteriormente realizara las valoraciones de productividad respectivas. Esto permitió que no se le impusiera al contratista una meta imposible de alcanzar.

La planta potabilizadora Sand Box de la Región Huetar Caribe se diseñó para un caudal de 90 L/s, por lo que el equipo de trabajo tenía expectativa de que luego de la

	Formulario de Informe Técnico I+D+i	Página 38 de 66
	Fecha de entrega: 14 de mayo de 2021	N° de Versión: 01

limpieza se pudieran alcanzar caudales suficientes para llegar cerca de la capacidad indicada. No obstante, es claro que la meta no se pudo alcanzar, probablemente por una condición de deterioro progresivo de la condición de flujo dentro del área de influencia de los pozos 2 y 3.

3.3. Lecciones aprendidas

Si bien la meta de esta iniciativa era resolver el problema de desabastecimiento producida por la baja productividad de los pozos 2 y 3 de Sand Box, el AyA también contempló la necesidad de generar capacidades en el personal operativo y de apoyo técnico. Es por ello que a continuación se lista una serie de lecciones aprendidas para este tipo de situaciones como las vividas en la Región Huétar Caribe:

- a) Verificar que todo pozo con presencia de hierro y manganeso cuente con un registro y análisis continuo de datos de caudal y nivel, de forma que se pueda vigilar la condición operativa real de este tipo de obras.
- b) Elaborar un control para este tipo de pozos, similar o mejor que el sugerido en informes anteriores (Lazo, 2020b), de forma tal que se pueda incluso pronosticar el comportamiento de fuentes subterráneas bajo ciertas condiciones operativas y del entorno. A esto se le puede agregar la ejecución de pruebas de recuperación, y la estimación de valores tales como: transmisividad, permeabilidad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, zona de captura, etc.
- c) Valorar la incorporación de algunos piezómetros en campos de pozos claves para abastecimiento poblacional (afectados por hierro y manganeso), con el fin de tener una imagen más realista de cualquier fenómeno adverso que se pudiera presentar en el acuífero captado. Esto hubiese permitido juzgar de manera más detallada el área exacta donde podría ubicarse algún posible “atascamiento” en la formación geológica circundante.



- d) No operar los pozos con un nivel dinámico que alcance las rejillas internas.
- e) Intervenir este tipo de fuentes subterráneas en el momento inicial que se detecte alguna variación en los parámetros operativos que pudiera indicar una afectación en la productividad. Una reacción tardía podría limitar o comprometer la operación futura de un acueducto. Según lo estudiado y valorado por el personal técnico a cargo del proceso, se tienen las siguientes sugerencias:
- Equipo AyA / Hidrotica: intervenir a partir de variaciones de un 10% de la capacidad específica.
 - Houben y Treskatis (2007): intervenir si el pozo ha perdido cerca de un 20% de la productividad original (capacidad específica).
 - Houben y Treskatis (2007): valorar el descarte del uso de un pozo si este ha perdido más del 50% de la productividad original (capacidad específica).
- f) Antes de implementar una limpieza en otras zonas con problemáticas similares, se debe diagnosticar adecuadamente el problema. Aunque el esquema de limpieza (mecánica + química) pueda ser igual al empleado en Sand Box, los productos a emplear no necesariamente serán los mismos empleados por Hidrotica.
- g) Mejorar la selección y uso del floculante utilizado previo a la inspección con cámara sumergible, pues en la filmación final no fue posible obtener buena visibilidad. Esto podría ser causado por diversas condiciones: sobredosificación, falta de mezcla, presencia de cloro u otros oxidantes en el agua de dilución inicial, etc.
- h) Planificar anticipadamente medidas de redundancia operativa que permitan satisfacer sin interrupción la demanda en los acueductos, con el fin de eliminar riesgos de desabastecimiento por situaciones como las ocurridas en Sand Box.



Esto fue ejecutado efectivamente por la Región Huetar Caribe y la UEN Administración de Proyectos.

- i) Valorar el uso de la hoja de cálculo propuesta para determinar el mejor uso de los productos químicos, en conjunto con las recomendaciones de fabricante (ver apéndice 8.1).

Como parte de una reacción a estas lecciones aprendidas y otras situaciones vividas por la operación durante la experiencia de Sand Box, se considera prudente implementar una nueva investigación donde se diseñe un protocolo para diagnóstico de problemas de posible incrustación por depósitos de hierro o manganeso. De ser posible, es altamente recomendable probarlo para generar más conocimiento institucional en este campo. Preliminarmente, se recomienda un protocolo que contemple los aspectos citados en el cuadro 8.

Cuadro 8 Propuesta preliminar de protocolo para valoración y limpieza de pozos afectados por hierro y manganeso

#	Etapas	Acciones	Criterios de valoración
1	Estudio de prueba de bombeo inicial	Determina nivel dinámico original. Estudia progresión del nivel dinámico. Determina nivel dinámico al momento del análisis. Verifica la ubicación del nivel dinámico en la progresión y en el momento del análisis, para determinar si se alcanza la rejilla.	Valora si es posible seguir operando con un caudal de explotación que no permita que el nivel dinámico alcance la rejilla. Esta condición se debe satisfacer para que se fundamente el realizar la limpieza química.
2	Valoración de la necesidad	Realizar una filmación interna del pozo. Determinar la capacidad específica del pozo en operación, por medio de prueba de bombeo. Estimar el porcentaje de pérdida de capacidad específica respecto a la prueba de bombeo inicial (al momento de su construcción).	<u>Pérdida de capacidad específica 10-20%</u> : planifica y ejecuta limpieza. <u>Pérdida de capacidad específica 21-50%</u> : valora limpieza química mientras construye nuevo pozo o busca nueva fuente. <u>Pérdida de capacidad específica >50%</u> : descarta el uso del pozo.




#	Etapa	Acciones	Criterios de valoración																																																												
3	Caracterización básica	<p>Caracterizar el agua del pozo según los siguientes parámetros:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Interpretación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>H₂S</td> <td>Potencial de procesos de reducción de sulfatos.</td> </tr> <tr> <td>Potencial oxidación-reducción (ORP)</td> <td>Condición de oxidación-reducción del agua.</td> </tr> <tr> <td>Oxígeno disuelto</td> <td>Ingreso de oxígeno al pozo.</td> </tr> <tr> <td>Hierro soluble / total</td> <td>Proporción entre hierro reducido y oxidado.</td> </tr> <tr> <td>Manganeso soluble / total</td> <td>Proporción entre manganeso reducido y oxidado.</td> </tr> <tr> <td>BART</td> <td>Análisis presuntivo para presencia de bacterias formadoras de biopelícula, bacterias del hierro, y reductoras de sulfato.</td> </tr> <tr> <td>Dureza total</td> <td>Debe valorarse para la selección de químicos.</td> </tr> <tr> <td>Alcalinidad</td> <td>Debe valorarse para la selección de químicos.</td> </tr> <tr> <td>pH</td> <td>Línea base antes de limpieza y permite valorar estados de oxidación de los metales.</td> </tr> <tr> <td>Color aparente</td> <td>Criterio indirecto para valorar limpiezas.</td> </tr> <tr> <td>Sólidos disueltos totales</td> <td>Línea base antes de limpieza.</td> </tr> <tr> <td>ATP</td> <td>Medición indirecta de presencia de microorganismos activos.</td> </tr> <tr> <td>Recuento total heterotrófico</td> <td>Medición indirecta de presencia de microorganismos.</td> </tr> <tr> <td>Conteo anaerobio</td> <td>Medición indirecta de condición del agua y de la presencia de oxidantes.</td> </tr> </tbody> </table>	Parámetro	Interpretación	H ₂ S	Potencial de procesos de reducción de sulfatos.	Potencial oxidación-reducción (ORP)	Condición de oxidación-reducción del agua.	Oxígeno disuelto	Ingreso de oxígeno al pozo.	Hierro soluble / total	Proporción entre hierro reducido y oxidado.	Manganeso soluble / total	Proporción entre manganeso reducido y oxidado.	BART	Análisis presuntivo para presencia de bacterias formadoras de biopelícula, bacterias del hierro, y reductoras de sulfato.	Dureza total	Debe valorarse para la selección de químicos.	Alcalinidad	Debe valorarse para la selección de químicos.	pH	Línea base antes de limpieza y permite valorar estados de oxidación de los metales.	Color aparente	Criterio indirecto para valorar limpiezas.	Sólidos disueltos totales	Línea base antes de limpieza.	ATP	Medición indirecta de presencia de microorganismos activos.	Recuento total heterotrófico	Medición indirecta de presencia de microorganismos.	Conteo anaerobio	Medición indirecta de condición del agua y de la presencia de oxidantes.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Parámetro</th> <th>Condición del pozo Limpio – Sucio</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>H₂S</td> <td>[≤ 0.05 - > 0.05] ppb</td> </tr> <tr> <td>Potencial oxidación-reducción (ORP)</td> <td>[≤ 100 / > 100] mV</td> </tr> <tr> <td>Oxígeno disuelto</td> <td>[≤ 0.5 / > 0.5] mg/L</td> </tr> <tr> <td>Hierro soluble / total</td> <td>[≥ 0.8 / < 0.8] mg/L</td> </tr> <tr> <td>Manganeso soluble / total</td> <td>[≥ 0.8 / < 0.8] mg/L</td> </tr> <tr> <td>BART</td> <td>Ausencia / Presencia</td> </tr> <tr> <td>Dureza total</td> <td>Se valora para químicos</td> </tr> <tr> <td>Alcalinidad</td> <td>Se valora para químicos</td> </tr> <tr> <td>pH</td> <td>Se valora para químicos</td> </tr> <tr> <td>Color aparente</td> <td>[< 5 / > 15] UPT-Co</td> </tr> <tr> <td>Sólidos disueltos totales</td> <td>Se valora para químicos</td> </tr> <tr> <td>ATP</td> <td>Según fabricante</td> </tr> <tr> <td>Recuento total heterotrófico</td> <td>[<100 / > 300] UFC/mL</td> </tr> <tr> <td>Conteo anaerobio</td> <td>[< 10 / > 20] %</td> </tr> </tbody> </table>	Parámetro	Condición del pozo Limpio – Sucio	H ₂ S	[≤ 0.05 - > 0.05] ppb	Potencial oxidación-reducción (ORP)	[≤ 100 / > 100] mV	Oxígeno disuelto	[≤ 0.5 / > 0.5] mg/L	Hierro soluble / total	[≥ 0.8 / < 0.8] mg/L	Manganeso soluble / total	[≥ 0.8 / < 0.8] mg/L	BART	Ausencia / Presencia	Dureza total	Se valora para químicos	Alcalinidad	Se valora para químicos	pH	Se valora para químicos	Color aparente	[< 5 / > 15] UPT-Co	Sólidos disueltos totales	Se valora para químicos	ATP	Según fabricante	Recuento total heterotrófico	[<100 / > 300] UFC/mL	Conteo anaerobio	[< 10 / > 20] %
Parámetro	Interpretación																																																														
H ₂ S	Potencial de procesos de reducción de sulfatos.																																																														
Potencial oxidación-reducción (ORP)	Condición de oxidación-reducción del agua.																																																														
Oxígeno disuelto	Ingreso de oxígeno al pozo.																																																														
Hierro soluble / total	Proporción entre hierro reducido y oxidado.																																																														
Manganeso soluble / total	Proporción entre manganeso reducido y oxidado.																																																														
BART	Análisis presuntivo para presencia de bacterias formadoras de biopelícula, bacterias del hierro, y reductoras de sulfato.																																																														
Dureza total	Debe valorarse para la selección de químicos.																																																														
Alcalinidad	Debe valorarse para la selección de químicos.																																																														
pH	Línea base antes de limpieza y permite valorar estados de oxidación de los metales.																																																														
Color aparente	Criterio indirecto para valorar limpiezas.																																																														
Sólidos disueltos totales	Línea base antes de limpieza.																																																														
ATP	Medición indirecta de presencia de microorganismos activos.																																																														
Recuento total heterotrófico	Medición indirecta de presencia de microorganismos.																																																														
Conteo anaerobio	Medición indirecta de condición del agua y de la presencia de oxidantes.																																																														
Parámetro	Condición del pozo Limpio – Sucio																																																														
H ₂ S	[≤ 0.05 - > 0.05] ppb																																																														
Potencial oxidación-reducción (ORP)	[≤ 100 / > 100] mV																																																														
Oxígeno disuelto	[≤ 0.5 / > 0.5] mg/L																																																														
Hierro soluble / total	[≥ 0.8 / < 0.8] mg/L																																																														
Manganeso soluble / total	[≥ 0.8 / < 0.8] mg/L																																																														
BART	Ausencia / Presencia																																																														
Dureza total	Se valora para químicos																																																														
Alcalinidad	Se valora para químicos																																																														
pH	Se valora para químicos																																																														
Color aparente	[< 5 / > 15] UPT-Co																																																														
Sólidos disueltos totales	Se valora para químicos																																																														
ATP	Según fabricante																																																														
Recuento total heterotrófico	[<100 / > 300] UFC/mL																																																														
Conteo anaerobio	[< 10 / > 20] %																																																														
4	Caracterización profunda (opcional)	Clasificación de los depósitos minerales, según su estructura.	Refuerza la selección del producto químico (ver figura A3).																																																												



#	Etapa	Acciones	Criterios de valoración
		Pruebas batch en laboratorio para determinar grado de disolución de los depósitos.	
5	Valoración de matriz geológica	Valora si el medio geológico circundante tiene alto contenido de sales de calcio o magnesio.	Refuerza la selección del producto químico, por tema de selectividad ante sales de carbonato de calcio o magnesio.
6	Selección de productos químicos para limpieza	Selecciona productos según actividades anteriores y previa consulta a proveedores internacionales.	Ver apéndices del presente informe.
7	Especificación de procedimientos para limpieza	Redacta procedimiento.	Ver procedimiento ejecutado por Hidrotica y consulta hojas técnicas de fabricantes.
8	Ejecución de limpieza	Ejecuta la limpieza de prueba.	Ver puntos siguientes.
9	Ejecución de prueba de bombeo	Realizar una filmación interna del pozo. Determinar la capacidad específica del pozo en operación, por medio de prueba de bombeo. Estimar el porcentaje de pérdida de capacidad específica respecto a la prueba de bombeo inicial (al momento de su construcción).	<u>Pérdida de capacidad específica 10-20%: planifica y ejecuta limpieza.</u> <u>Pérdida de capacidad específica 21-50%: valora limpieza química mientras construye nuevo pozo o busca nueva fuente.</u> <u>Pérdida de capacidad específica >50%: descarta el uso del pozo.</u>
10	Verificación del desempeño de la limpieza	Realiza nueva caracterización básica.	Para pasar al siguiente punto debe satisfacer criterios para parámetros de caracterización básica. Además, la filmación debe demostrar visualmente la mejora en la condición interna del pozo. En caso de obtener resultado negativo, repetir puntos 7 a 10.
11	Rehabilita el servicio	Evalúa calidad fisicoquímica y microbiológica.	Si cumple Reglamento para la Calidad del Agua Potable y se obtienen valores satisfactorios en el punto anterior, se pone en operación el pozo.

Referencia: elaboración propia, Kinzel (2021), Palmer (2021)

En adición a lo anterior, se recomienda ejecutar un plan piloto por medio del cual se realicen y valoren las siguientes pruebas para cualquier pozo nuevo que se construya: [BART](#), recuento total heterotrófico y conteo anaerobio. En caso de que existan valores anómalos, se deberá valorar el caso específico para preparar las medidas a tomar

	Formulario de Informe Técnico I+D+i		Página 43 de 66
	Fecha de entrega: 14 de mayo de 2021		N° de Versión: 01

durante la operación del pozo. Además, esto permitirá reforzar la necesidad eventual de mejorar aún más la limpieza previa de las herramientas utilizadas para perforación.

Finalmente, no se deben dejar de lado los conocimientos adquiridos por la institución en otras áreas operativas. De acuerdo con Ramírez (2020), en un sistema ubicado en Cartago, para realizar una limpieza química de pozos se realiza lo siguiente:

- Se levanta el equipo de bombeo a 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 agrega el producto químico deseado.
- Se recircula el agua uno o dos días.
- Se sienta el equipo en su posición normal.
- Se activa el pozo, pero botando el agua hasta lograr que desaparezca cualquier rastro del tratamiento.

De acuerdo con las fichas técnicas aportadas por Ramírez (2020), los productos utilizados son Aquaclear AE® y Aquaclear MGA®. Estos productos son los mismos utilizados en Sand Box, los cuales aparentemente se utilizan combinados (ver cuadro 7). Esto constituye también una medida que se puede aplicar como mantenimiento preventivo.

4. CONCLUSIONES

A continuación, se enlistan las conclusiones de este informe:

- El cartel de contratación elaborado fue adecuado para la naturaleza de los trabajos realizados, tanto desde el punto de vista de las labores técnicas, así como en relación con el personal profesional a cargo de los trabajos.



- En el país existe una oferta muy limitada de empresas especializadas en mantenimiento de pozos.
- El costo de limpieza química para el caso de Sand Box fue cercano a ϕ 10 000 000.
- La capacidad específica de un pozo es el parámetro más recomendado para determinar la productividad de este tipo de obras, además de que es un valor que se puede medir fácilmente.
- El procedimiento de limpieza del pozo 3 no permitió mejorar la productividad de esta fuente subterránea.
- El procedimiento de limpieza del pozo 2 sí permitió mejorar la productividad de esta fuente subterránea en un 87%.
- En el caso del pozo 2, se reestableció la capacidad específica hasta alcanzar un 20% del valor original de su prueba de bombeo al momento de haber sido construido.
- En el caso del pozo 3, se reestableció la capacidad específica hasta alcanzar un 12% del valor original de su prueba de bombeo al momento de haber sido construido.
- Se deben acompañar procedimientos de limpieza química siempre con una o más limpiezas mecánicas.
- El ácido glicólico (hidroxiacético) y el sulfámico constituyen las dos sustancias más recomendadas para limpieza de pozos con depósitos de hierro (mineral y bacteriano) y su aplicación se realiza de manera simultánea. Esto, aunque existen otras posibilidades, como los agentes reductores y los quelantes.
- El parámetro de pH es un poco más representativo que el de sólidos disueltos para dar seguimiento a la presencia de los productos químicos en los pozos. Debe



estar claro desde el inicio del proceso cuál es la consigna que se desea mantener y el tiempo de contacto óptimo.

- Los procedimientos de limpieza química podrían generar cambios temporales en la calidad de agua de los pozos, lo cual debe ser debidamente analizado por la operación.
- Es posible emplear un agente espumante como complemento a la limpieza con ácidos orgánicos e inorgánicos, con el fin de extraer sólidos suspendidos resultantes del procedimiento.
- Según recomendación del contratista, la mayoría de las aplicaciones de los productos químicos se realizaron con base en datos volumétricos y no consideraron algún indicador químico o biológico relacionado con “grado de ensuciamiento”.
- Se requiere un sistema de gestión de residuos para este tipo de limpiezas, según lo indicado por las fichas técnicas de los productos químicos utilizados.

5. RECOMENDACIONES

A continuación, se enlistan las recomendaciones producto del análisis realizado:

- Analizar con el personal de Microbiología y Química del Laboratorio Nacional de Aguas la necesidad de crear un protocolo de muestreo y análisis enfocado a indicadores químicos o biológicos que permitan identificar si existe un alto potencial de ensuciamiento para pozos (nuevos o existentes) cuya agua tiene presencia significativa de hierro y manganeso.
- Capacitar al personal de la UEN Administración de Proyectos en el uso de productos químicos como los citados en el cuadro 5, ya sea para futuros contratos similares al ejecutado en Sand Box, o bien para ejecutar este tipo de labores con personal y equipo propio.



- Divulgar el presente caso de estudio con todas las áreas operativas de la institución y de gestión de ASADAS, para fortalecer la sostenibilidad de los acueductos que brindan servicio a la población por medio de las lecciones aprendidas que se documentaron (sección 3.3).
- Elaborar un procedimiento paso a paso, similar a hoja técnica, que permita describir cómo se realiza una limpieza química de esta naturaleza. Esto haciendo la salvedad de que cada caso requiere un diagnóstico específico.
- Recopilar a nivel institucional cuáles son los casos más típicos de ensuciamiento de rejillas, de manera que se generen procedimientos de limpieza aplicables a la mayoría las potenciales situaciones operativas que se pudieran presentar.
- Valorar la necesidad institucional de investigar más acerca de cómo detectar los fenómenos de disminución de productividad en pozos. Como parte de este esfuerzo, valorar en un espacio interdisciplinario conjunto con el Laboratorio Nacional de Aguas, el implementar el protocolo propuesto en el cuadro 8.
- Valorar el costo-beneficio de la construcción de los pozos con ademe metálico para poder realizar limpiezas más vigorosas, considerando el potencial de oxidación o afectación de otro tipo debido a características propias del agua.
- Intervenir pozos con limpieza mecánica y química si este ha perdido entre un 10% y un 20% de la productividad original (capacidad específica).
- Valorar el descarte del uso de un pozo si este ha perdido más del 50% de la productividad original (capacidad específica).
- Valorar la medida de mantenimiento preventivo sugerida por Ramírez (2020), tal y como se describe en la sección 3.3.



6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alpízar, R. (2020). *Inspección con cámara sumergible en los pozos #2 y #3 – Planta Sand Box*. Hidrotica S.A.: Contratación 2020CD-000040-0021400002 del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.
- Chemours Company (CC). 2020. *Glycolic Acid: product attributes*. [En línea] Disponible en: <https://www.chemours.com/en/-/media/files/glycolic-acid/glycolic-acid-treatment-water-well.pdf> [Accesado 10 Diciembre 2020].
- Hacket, G.; Lehr, J. (1985). *Iron bacteria occurrence, problems, and control methods in water wells*. Worthington: National Water Well Association.
- Houben, G; Treskatis, C. (2007). *Water well rehabilitation and reconstruction*. New York: McGraw-Hill Company.
- Kinzel, K. 2021. *Water well rehabilitation, chemicals and best practices*. [En línea] Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=XCuQcZ09BI4> [Accesado 16 Mayo 2021].
- Lazo, A. (2020a). *Limpieza de pozos en Sand Box*. Costa Rica: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.
- Lazo, A. (2020b). *Análisis de datos de explotación de pozos en Sand Box*. Costa Rica: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.
- Matarrita, J. (2020). *Datos operativos de los pozos 2 y 3 del sistema Sand Box*. Limón: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.
- 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]



- Palmer, L. 2021. *ASR Well Maintenance: what happens when ASR wells stop giving*. [En línea] Disponible en: https://www.pnws-awwa.org/uploads/PDFs/conferences/2015/Technical%20Sessions/Wednesday%20Pre%20Cons/5_ASR%20Well%20Maintenance_When%20they%20Stop%20Giving.pdf [Accesado 17 Mayo 2021].
- Ramírez, M. (2020) *Mantenimiento químico periódico para pozos afectados por hierro y manganeso en la Gran Área Metropolitana*. [Correo electrónico] (Comunicación personal, 26 Febrero 2020).
- Ramos, O. (2020). *Reporte de limpieza química de pozos N° 11-15 y N° 11-16 de la Región Caribe, Planta Sand Box*. Hidrotica S.A.: Contratación 2020CD-000040-0021400002 del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.
- Smith, S. 2016. *Well rehabilitation methods – not the same always*. [En línea] Disponible en: <https://groundwaterscience.com/attachments/article/126/Well%20Rehabilitation%20Methods%20new%202016-website.pdf> [Accesado 10 Diciembre 2020].



7. CONTROL DE CAMBIOS

N° Versión	Justificación de los cambios	Descripción de los cambios

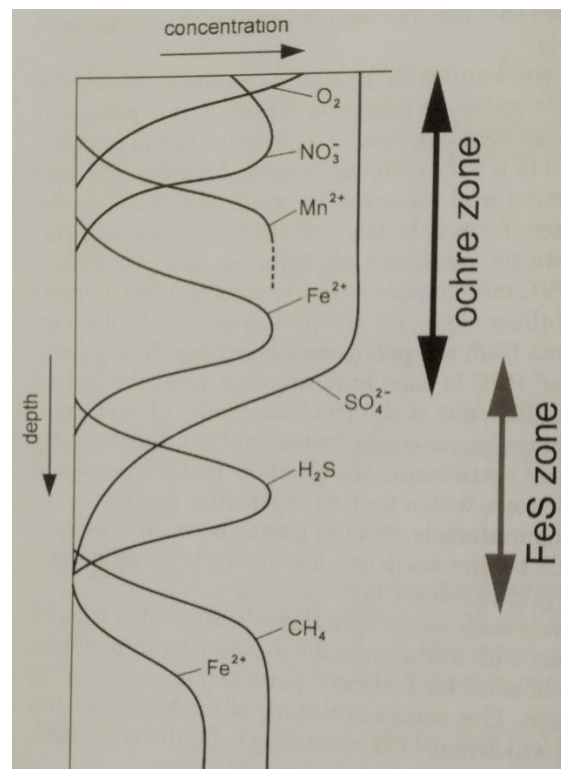
8. APÉNDICES

8.1. [Hoja de cálculo para uso de productos químicos.](#)

8.2. Zonificación hidroquímica

Como complemento a las lecciones aprendidas, se revisó la publicación realizada por Houben y Treskatis (2007), con el fin de extraer aspectos clave que se deben cumplir tanto para labores de mantenimiento preventivo como correctivo de pozos afectados por hierro y manganeso. Este autor indica que en países como Alemania cerca del 84% de los casos de pozos afectados por incrustaciones se deben a la presencia de ocre (óxidos de hierro), mientras que otras afectaciones posibles son: carbonatos (3.2%), biopelículas microbianas (1.4%), hidróxidos de aluminio (0.4%) y algunas no especificadas (11.0%).

Figura A1. Distribución vertical de zonas redox y sus especies indicadoras en agua subterránea.



Referencia: Houben y Treskatis (2007).



Houben y Treskatis (2007) indican que muchos acuíferos presentan una zonificación hidroquímica de carácter vertical, incluso si no existen capas impermeables intercaladas. Esto se da como consecuencia de la reacción de del agua que se infiltra en el suelo dentro de la matriz del acuífero. Dado que estas reacciones dependen del tiempo de residencia, la hidroquímica del agua presenta cambios según la profundidad. Se dice que cuando hay traslape de dos o más zonas geoquímicas por medio de rejillas, se puede disparar la formación de ocre o sulfuro de hidrógeno.

El mismo autor indica que el agua de recarga que se infiltra en el suelo contiene oxígeno disuelto, y lo incorpora a la capa más superficial de agua subterránea. Es por ello que esta sección superior de la columna de agua subterránea se conoce como la zona óxica. Debido a que el oxígeno es un oxidante fuerte, éste es utilizado por ciertos microorganismos presentes en el acuífero para oxidar materia orgánica (presente en Sand Box) para ganar energía. Luego de que esta entrada de oxígeno se termina, el agua percola hacia la parte inferior, donde otras bacterias atacan el siguiente oxidante disponible, el cual es el nitrato.

Una vez que se alcanza la desnitrificación completa, otras bacterias a mayores profundidades disuelven el manganeso sólido y luego los óxidos de hierro. Esto causa elevadas concentraciones de Mn^{2+} y Fe^{2+} en el agua. Las últimas tres zonas indicadas se conocen con el término de “post-óxicas”. La última parte de la columna es la que presenta actividad de bacterias reductoras de sulfato, las cuales utilizan sulfato para convertirlo en sulfuro (sulfuro de hidrógeno). Eventualmente, las bacterias metanogénicas presentes en lo más profundo del agua subterránea toman lo que aparece como fuente residual de energía, lo que no consumieron otros organismos más superficiales o intermedios.

De esta secuencia se puede esperar que la cantidad de energía que se puede ganar es menor conforme se profundiza en el agua subterránea. No obstante, es importante que el hierro ferroso (+2) puede aparecer tanto en la zona post-óxica como en la

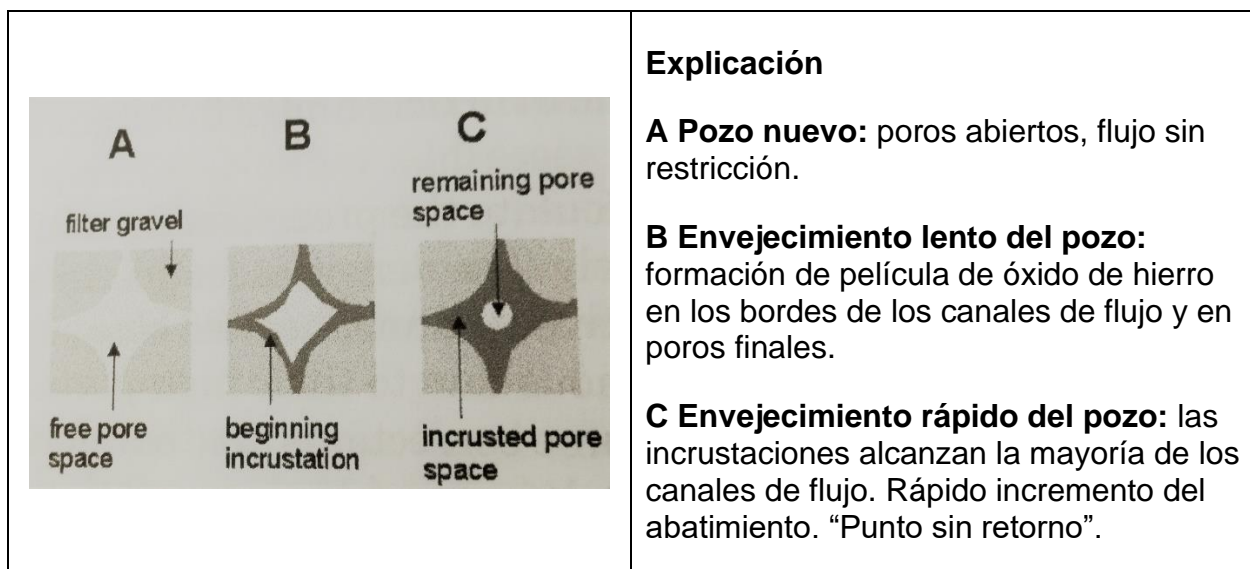


metanogénica. El profundizar una sección de rejillas para extraer agua de un pozo, podría ser que no reduzca la posibilidad de obtener agua con alto contenido de hierro ferroso. Prácticas constructivas que implican la instalación de rejilla sin considerar zonas hidroquímicas e incluso la alta turbulencia en la captación del agua subterránea (dentro y alrededor del pozo) también favorece procesos de mezcla que pueden modificar el potencial redox, con la consecuente precipitación de óxidos de hierro.

8.3. Progresividad de incrustaciones

Houben y Treskatis (2007) indican que las operaciones que buscan reestablecer la capacidad específica de un pozo se enfocan en recuperar el espacio disponible entre los granos que componen la grava y el material geológico circundante. Estas prácticas usualmente permiten recuperar parte de la permeabilidad hidráulica, pero incrementan la disponibilidad de un área superficial autocatalítica (depositada sobre el material sólido), la cual acelera la oxidación del hierro ferroso. Esto explica por qué los pozos rehabilitados muchas veces muestran una pérdida muy rápida y clara de la capacidad hidráulica poco tiempo después de su rehabilitación (ver figura A2).

Figura A2. Atascamiento progresivo de poros por incrustaciones



Referencia: Houben y Treskatis (2007).



De manera complementaria, el análisis geoquímico de diversas incrustaciones en pozos de agua usualmente muestra porciones significativas de sílice y ocasionalmente aluminio. Esto usualmente se relaciona con depósitos pasivos y progresivos de cuarzo (SiO_2), arcillas (kaolinita, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), y feldespatos (KAlSi_3O_8). Esta condición tiene origen en minerales presentes en el acuífero o incluso puede ser parte de material incorporado en la grava de empaque utilizada en la construcción (Houben y Treskatis, 2007).

Finalmente, es importante mencionar que algunos estudios muestran que la distribución espacial de la incrustación dentro del armado del pozo no es homogénea. Típicamente tiende a haber más abundancia en la sección superior de la rejilla, si se compara con la parte baja de la misma. Adicionalmente, ha sido evidenciado que la incrustación más fuerte usualmente se presenta en la sección de rejilla que recibe el flujo de agua subterránea. La sección opuesta al flujo de agua subterránea normalmente muestra menor grado de acumulación de materiales.

8.4. Procedimientos para monitoreo del envejecimiento del pozo

Houben y Treskatis (2007) especifican varias opciones para monitorear el envejecimiento de pozos, con sus respectivas recomendaciones (anexo, sección 14.6). Los autores indican que pruebas de bombeo intermedias entre limpieza física y limpieza química ayudan a determinar la contribución de cada procedimiento a la mejora de la condición operativa del pozo. Por otra parte, se hace especial énfasis en la aplicación de técnicas de geofísica.

En adición a lo anterior, Houben y Treskatis (2007) sintetizan de la siguiente manera los principales causantes de ensuciamiento e incrustación de pozos:

- Elevadas concentraciones de sustancias químicas capaces de generar incrustación.



- Mezcla de aguas de diferentes zonas hidroquímicas, lo cual genera una fuerte sobresaturación de minerales.
- Elevado pH, para la precipitación de ocre.
- Elevada dureza, para la precipitación de carbonatos.
- Ingreso de oxígeno al interior del pozo e incluso a la rejilla (cuando hay mucho abatimiento).
- Elevado suministro de nutrientes en el agua, lo cual promueve el crecimiento bacteriano.
- Elevadas velocidades de flujo o incluso condiciones turbulentas.
- Bajas porosidades en el acuífero y el empaque de grava.
- Tamaño de grano con distribución no uniforme.

Según diversas publicaciones, cuando se obtienen recuperaciones bajas respecto al valor de capacidad específica cuando el pozo está recién construido, lo mejor es abandonar esta fuente de agua subterránea. No existe un valor numérico específico; sin embargo, se conoce lo indicado en el cuadro A1. Se cree que cuando una rehabilitación repetitiva no incrementa la productividad de un pozo en más del 50% del valor original, se debe asumir que las incrustaciones alcanzaron un nivel de cristalización, lo cual impide su remoción completa.

Cuadro A1. Porcentaje de reducción respecto a la capacidad específica original de un pozo, que se considera aceptable para ejecutar labores de mantenimiento para mejorar la productividad.

Autor	Valor
Diversos, experiencia alemana.	20%
Driscoll (1989)	25%
McLaughlan (2002)	10%

Referencia: Elaboración propia con datos de Houben y Treskatis (2007).



8.5. Procedimientos para rehabilitación con productos químicos (Houben y Treskatis, 2007)

En principio, todas las técnicas de rehabilitación química se basan en un cambio de fase, donde los minerales de una incrustación sólida son convertidos a constituyentes disueltos. Esto se puede lograr por medio de cambios fuertes en el medio acuoso, especialmente en términos de pH y potencial oxidación-reducción (ORP). En ocasiones no se requiere una remoción completa de la masa incrustada. Si los productos químicos destruyen los enlaces intercristalinos, las partículas más pequeñas de la incrustación podrán ser evacuadas por medio de agitación mecánica.

Usualmente, incrustaciones viejas y de carácter cristalino sobre elementos con poca área superficial son más difíciles de disolver que las acumulaciones más jóvenes con la misma área superficial expuesta. Además, el pretratamiento mecánico que se realiza para disminuir el tamaño de los minerales acumulados, mejora significativamente el desempeño de una rehabilitación química. En caso excepcionales, la presencia de aniones tales como fosfato, borato y arsenato disminuye la tasa de disolución de óxidos de hierro en forma significativa.

8.5.1. Procesos para disolución para hierro y manganeso

Para la **disolución de óxidos de hierro y manganeso** los tres principales mecanismos de acción para cambiar la fase de estos materiales son: disolución asistida por protonación, disolución asistida por ligandos y reducción. En el caso de la protonación, se busca una reducción fuerte del pH por medio de la adición de ácidos (contienen protones), los cuales reaccionan con los grupos hidróxido de las superficies afectadas, causando la liberación de hierro férrico y manganeso. Este proceso es altamente dependiente del pH, cuyo valor no debe ser inferior a 1 (preferiblemente).

La fuerza de un ácido se define por su potencial para liberar protones, lo cual se expresa por medio de una constante de reacción denominada pK_a . Valores bajos de esta



constante representan ácidos con capacidad de liberar protones más fácilmente. Algunos ejemplos de sustancias ácidas se presentan en el cuadro A2.

Cuadro A2. Constantes de disociación ácida para productos utilizados en rehabilitación de pozos.

Nombre del ácido	Fórmula química	pK_{a1}	pK_{a2}	pK_{a3}	pH de una solución al 0.1 M
Ácido clorhídrico	HCl	~ -6	-	-	1.00
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	~ -3	1.89	-	0.70
Ácido ascórbico	C ₆ H ₈ O ₆	4.10	11.79	-	2.55
Ácido cítrico	C ₆ H ₈ O ₇	3.14	4.77	6.39	2.07
Ácido sulfámico	NH ₂ SO ₃ H	0.99	-	-	1.00
Ácido glicólico	C ₂ H ₄ O ₃	3.83	-	-	2.42
Ácido malónico	C ₃ H ₄ O ₄	2.83	-	-	1.92

Referencia: Houben y Treskatis (2007).

La solubilidad de los óxidos de hierro a pH superior a 1.5 es bastante menor a aquella que se puede alcanzar a valores inferiores. Usualmente, se considera trabajar este tipo de limpiezas con el menor valor de pH que sea posible alcanzar, sin causar corrosión a los materiales del pozo. Algunas fuentes citan como valor estándar 0.9, aunque como se indicaba antes, cada caso se debe valorar por aparte.

En el caso de acuíferos que contienen contenidos significativos de carbonatos (dureza del agua), una gran parte del ácido adicionado reacciona con estos materiales en lugar de atacar las incrustaciones de hierro. Por lo anterior, se puede presentar una falsa sensación de acción química por parte del ácido, sin que se logre el objetivo definitivo. Otros puntos en contra a considerar para el uso de ácidos son:

- Potencial de promoción de la corrosión.
- Potencial de contracción de arcillas.
- Los óxidos de hierro y manganeso tienen carácter anfótero, por lo que el efecto de insolubilización se puede revertir si no se controla el pH adecuadamente.



Para la **disolución por ligandos** se emplean moléculas o iones que tienen pares de electrones libres, los cuales se unen al ion metálico y lo liberan constituido como un complejo (una unión de un catión con una molécula). Este tipo de sustancias usualmente tienen baja eficiencia para ser empleados en rehabilitaciones y más bien se usan como aditivos, acompañando ácidos o sustancias reductoras.

En el caso de **disolución por reducción**, se emplean sustancias orgánicas e inorgánicas que transforman el hierro y manganeso oxidados en especies reducidas, lo cual implica que se solubilizan. Uno de los productos más utilizados con este fin es el ácido ascórbico (vitamina C). De hecho, este compuesto cumple dos funciones: actúa como liberador de protones para diluir por ese mecanismo y además funciona como ligando y agente para lograr condiciones reductoras en el medio acuoso.


8.5.2. Oxidación o disolución de biomasa

Con el fin de atacar biomasa acumulada en algunos casos particulares, es posible emplear oxidantes fuertes, los cuales mineralizan el material biológico. No se recomienda el uso de permanganato de potasio pues puede fomentar la formación de óxidos de manganeso. En el caso del ozono, se considera poco costo efectivo y difícil de producir en sitio para su aplicación directa. Y en el caso de la aplicación de cloración, se encuentran las siguientes desventajas:

- Oxidación colateral del hierro y el manganeso (atascamiento).
- Formación de compuestos halogenados dañinos para la salud.
- Potencial daño a ciertos materiales de construcción en el interior del pozo.

8.5.3. Remoción de remanentes de fluidos de perforación

Como resultado de una remoción insuficiente de fluidos de perforación durante la construcción o el desarrollo, es posible que una porción de la bentonita o la carboximetilcelulosa (CMC) haya permanecido en el medio geológico, especialmente en

	Formulario de Informe Técnico I+D+i		Página 58 de 66
	Fecha de entrega: 14 de mayo de 2021		N° de Versión: 01

la pared de la perforación y sus alrededores. Estos productos bloquean espacios de poro y disminuyen la productividad del pozo. Su remoción no se considera como una rehabilitación química en el sentido estricto, pero esto debe ser mencionado debido a que es una situación que se presenta con frecuencia.

Particularmente la bentonita, al entrar en contacto con agua, retiene algunas moléculas en capas intermedias cristalinas, lo cual provoca que el mineral se expanda. Esta expansión permite sellar las paredes de la perforación y disminuir las pérdidas por circulación. A un pH neutral, las partículas tienen carga negativa en la superficie mineral y carga positiva en los bordes. La atracción electrostática entre estas cargas opuestas conlleva el desarrollo de estructuras voluminosas, con la consecuente fuerza de cohesión.

La adición de altas concentraciones de sales causa la floculación de la bentonita. A pesar del efecto reductor de volumen, los coágulos que se producen por esta acción son demasiado grandes como para ser removidos, y se mantienen atascando los poros. Por lo tanto, el objetivo de la operación es reducir la viscosidad sin floculación. Usualmente, para contrarrestar la interacción electrostática entre las partículas, se agregan moléculas con muchas cargas negativas, usualmente polifosfatos. Este proceso permite que la bentonita se logre fluidizar y que pueda ser bombeada eventualmente. Debido a que los polifosfatos son una buena fuente de nutrientes para muchas bacterias y algas, en muchos casos se inyecta al pozo un agente biocida al mismo tiempo.

8.6. Aditivos para limpieza química

Los aditivos son productos químicos que no participan propiamente en el proceso de reacción que disuelve las incrustaciones (Houben y Treskatis, 2007). Estas sustancias cumplen dos funciones principales:

- Complementar los productos químicos reactivos ya que promueven condiciones fisicoquímicas adecuadas.



- Bloquear efectos negativos de los productos químicos reactivos.


Los efectos corrosivos de los ácidos sobre superficies metálicas son bien conocidos. Por esta razón, algunos ácidos contienen inhibidores de corrosión. Generalmente se emplean fosfatos acídicos, los cuales forman una capa protectora de fosfato de hierro sobre la superficie metálica. Un producto alternativo es la dietiltiourea ($C_5H_{12}N_2S$).

Por otra parte, los emulsificantes (surfactantes, tensoactivos) reducen la tensión superficial en la interfase entre el fluido empleado para rehabilitación química y la incrustación sólida que se desea disolver. Esta función permite mejorar el contacto con la superficie mineral al mismo tiempo que se facilita la penetración del fluido en las microfisuras y los poros finos. Típicamente, los químicos utilizados son de origen orgánico; se debe tener cuidado pues pueden funcionar como fuente de alimento para las bacterias.

Los productos empleados para rehabilitación usualmente son iónicos, o sea que contienen moléculas cargadas. Si la superficie mineral tiene la misma carga que una especie disuelta, se produce una pequeña fuerza repulsiva que disminuye la afinidad hacia la superficie objetivo. Las partículas de ocre muestran este comportamiento. Es por ello que se emplean sales simples como una forma para sobreponerse a la carga superficial, promoviendo la reacción de disolución. Un ejemplo de este tipo de sustancias es la sal de mesa ($NaCl$).

En el caso de los agentes reductores (sección 8.5.1), se tiene un mejor desempeño bajo condiciones neutras de pH. Debido a que la reacción de disolución altera el pH, usualmente se utiliza una solución amortiguadora. En caso contrario, se produciría una reducción en el progreso (velocidad) de la reacción.

Los químicos orgánicos que se utilizan para rehabilitación de pozos pueden resultar una fuente de alimento para diferentes microorganismos, lo cual puede provocar un efecto adverso de contaminación microbiológica. Por ello, muchos de esos productos

	Formulario de Informe Técnico I+D+i		Página 60 de 66
	Fecha de entrega: 14 de mayo de 2021		N° de Versión: 01

contienen aditivos microbiocidas. Algunos de los más comunes son sales de plata, como el nitrato de plata.

El uso de temperatura es una práctica común, para acelerar y hacer reacciones más eficientes. Existen recomendaciones de calentar previamente los químicos a utilizar en rehabilitaciones químicas a 70°C. Esto incluso se ha llegado a implementar para el agua del pozo propiamente, debido al efecto microbiocida de la temperatura. No obstante, esta práctica no es recomendada cuando se desconoce la cantidad de biomasa presente o si se sabe que existe una cantidad considerable de esta. El material biomásico podría coagular en agua caliente y atascar fácilmente los poros del empaque de grava.

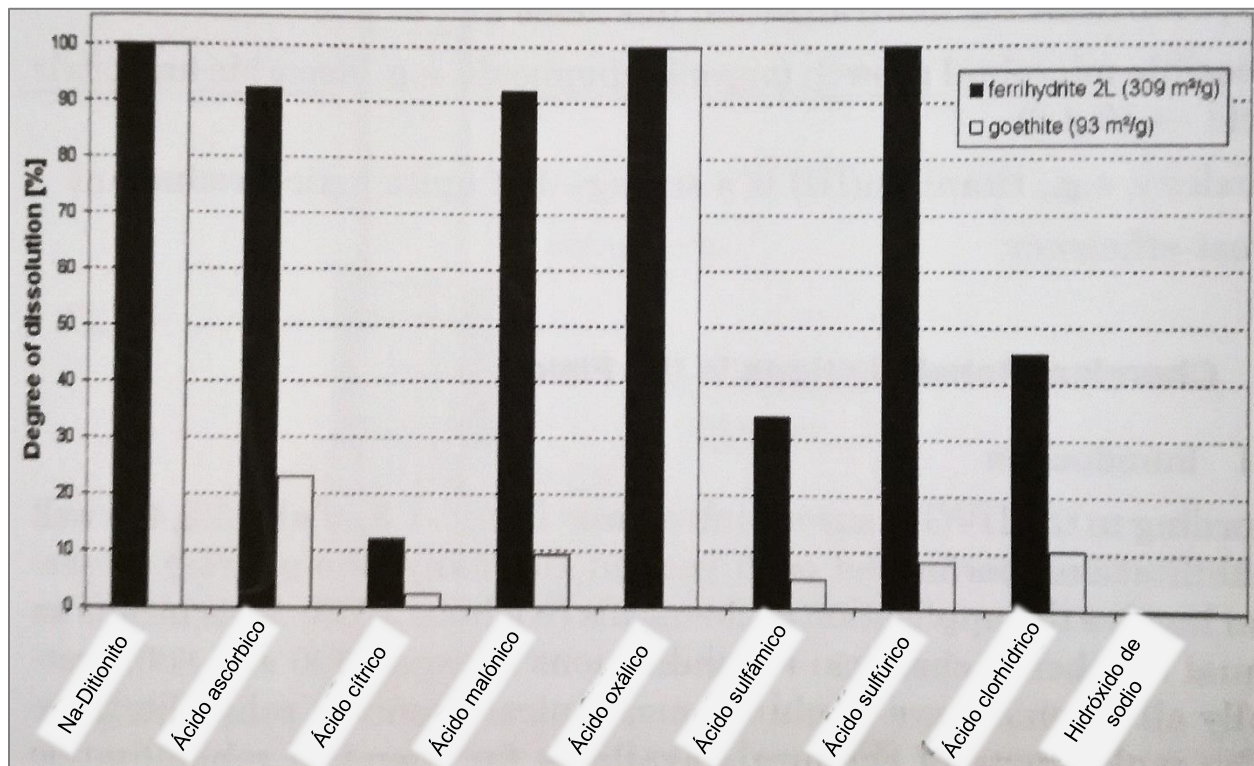
8.7. Comparación del desempeño de productos para limpiezas químicas

La eficiencia de un agente químico puede ser descrita por la conversión (de especies químicas) que provoca durante un intervalo de tiempo definido. Las tasas de reacción más altas son deseadas porque permiten una operación rápida y minimizan el potencial tiempo de residencia en los pozos, al mismo tiempo que reducen la posible migración del producto químico dentro del acuífero.

Houben y Treskatis (2007) realizaron una serie de experimentos acerca de la eficiencia de varios químicos para rehabilitación sobre incrustaciones de ocre de origen sintético: dos tipos de ferrihidrita, un tipo de lepidocrocita y goetita. Los autores emplearon el mineral sintetizado, agua desionizada, temperatura de 25 °C y burbujeo de nitrógeno gaseoso para minimizar la oxidación de componentes en el medio acuoso.

De acuerdo con los resultados de la figura A3, el ditionito de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$), el cual es un reductor fuerte, y el ácido oxálico ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$) resultaron los productos más efectivos en términos de eficiencia y velocidad de reacción. Ambos químicos disolvieron la ferrihidrita y la goetita rápidamente. El ácido oxálico tiene la desventaja de poder llegar a ser un sustrato para crecimiento microbiano.


Figura A3. Grados de disolución obtenidos por medio de diferentes químicos sobre minerales sintéticos de óxido de hierro, poco cristalinos (ferrihidrita) y altamente cristalinos (goetita), luego de 7 horas



Referencia: Houben y Treskatis (2007)

En el caso del ditionito de sodio, se debe tener en cuenta que las tasas de reducción más altas se pueden alcanzar a pH neutral. Por esta razón es recomendable generar una condición amortiguadora en conjunto con carbonato de sodio. Una combinación muy utilizada involucra lo antes indicado más un agente complejante, como el citrato. Algunos experimentos han mostrado remoción de minerales mayores al 70% luego de 100 minutos de reacción.

Por otra parte, aunque es muy utilizado en limpiezas de pozos, el ácido clorhídrico no mostró buenos resultados. El ácido sulfúrico si mostró una eficiencia mayor, aunque no mantuvo ese comportamiento para la goetita. Tanto el ácido ascórbico como el malónico fueron muy efectivos ante la ferrihidrita pero disminuyeron su rendimiento al ser puestos

	Formulario de Informe Técnico I+D+i		Página 62 de 66
	Fecha de entrega: 14 de mayo de 2021		N° de Versión: 01

en contacto con la goetita. En el caso del sulfámico y el cítrico no mostraron valores prometedores.

Como parte de sus conclusiones, Houben y Treskatis (2007) indican que la edad (cristalinidad) de los óxidos de hierro tiene una influencia grande en su solubilidad, sin importar el producto químico. El área superficial específica del mineral es un buen indicador de su reactividad. Por otra parte, además de la eficiencia y la velocidad de reacción, los autores recomiendan considerar lo siguiente en la selección del producto a utilizar en rehabilitaciones químicas:

- Efectos corrosivos sobre el material de construcción del pozo.
- Requerimiento de aditivos.
- Gastos para neutralización de residuos.
- Posible crecimiento microbiano (químicos orgánicos).
- Toxicidad.
- Costo-beneficio.

8.8. Otras recomendaciones para la ejecución de limpieza de pozos

En adición a lo citado en secciones anteriores, Houben y Treskatis (2007) resumen algunas recomendaciones para planificar limpieza química de pozos:

- Hacer previamente una limpieza mecánica, pues la limpieza química solo contribuye entre un 40 y un 60% de la recuperación de productividad.
- Considerar que los químicos usualmente tienen una densidad mayor a la del agua, por lo que tenderán a fluir hacia la parte inferior del pozo. Por lo tanto, la disolución aplicada debe circular en la sección que se busca limpiar, empleando un sistema de bombeo de circuito cerrado y tapones (“packers”). Esto, siempre que el material presente buena rigidez.



- Limpiar la sección ranurada de abajo hacia arriba, por la diferencia de densidades antes indicada.
- Apagar los pozos circundantes durante la limpieza con el fin de evitar que los químicos fluyan en dirección a ellos.
- Monitorear la posible formación de gases por las reacciones que podrían presentarse dentro del pozo.
- Valorar un enfoque multietapa: limpieza mecánica + limpieza química + limpieza mecánica.
- Considerar que los microorganismos son muy adaptativos. Tienen a generar una biopelícula protectora que los defiende de ataques químicos o mecánicos. Una aplicación de procedimientos repetidos (especialmente desinfecciones) o una acumulación incorrecta de biomasa luego de limpiezas, promoverá mayor crecimiento bacteriano.
- Si el pozo ha perdido cerca de un 20% de la productividad original, proceda a rehabilitar.
- Si el pozo ha perdido más del 50% de la productividad original, valore descartar su uso.



9. ANEXOS

- 14.1. [Perfil constructivo del pozo Sand Box 2 \(N° 11-15\)](#)
- 14.2. [Perfil constructivo del pozo Sand Box 3 \(N° 11-16\)](#)
- 14.3. [Fichas técnicas de los productos químicos](#)
- 14.4. [Informe de filmación](#)
- 14.5. [Informe de limpieza química](#)
- 14.6. **Técnicas para monitoreo de envejecimiento de pozos (Houben y Treskatis, 2007)**

Técnica	Aspectos a evaluar durante el procedimiento
Inspección con cámara	<ol style="list-style-type: none">1. Señales de corrosión.2. Daños mecánicos.3. Estado de las conexiones entre secciones del armado.4. Cantidad de sedimentos en el fondo.5. Cantidad y tipo de incrustaciones.6. Distribución espacial de incrustaciones (líneas de flujo).7. Se recomienda realizarlo antes y después.
Pruebas escalonadas de descarga	<ol style="list-style-type: none">1. Considerar al menos 3 a 5 tasas de bombeo.2. Medición permanente del abatimiento.3. Variables con medición hasta que se obtengan niveles de agua constantes.4. Duración total para cada prueba de bombeo (1 tasa de bombeo): 1 – 24 h. Se han utilizado en ocasiones con duraciones totales de 3 h.5. Intervalo de medición de variables para etapas de bombeo individuales según normativa alemana (DVGW W 111):<ol style="list-style-type: none">a. Tiempo de bombeo \leq 10 min: cada 1 min.b. Tiempo de bombeo \leq 60 min: cada 5 min.c. Tiempo de bombeo \leq 3 h: cada 10 min.d. Tiempo de bombeo \leq 5 h: cada 30 min.e. Tiempo de bombeo $>$ 5 h: cada 60 min.6. Recuperación: 2/3 del tiempo de bombeo, con los intervalos de medición correspondientes. <p>Adicionalmente, se recomienda considerar los siguientes pasos en cada prueba de bombeo (cada escalón):</p> <ul style="list-style-type: none">• Apagar el pozo y sus pozos vecinos.• Leer el medidor de caudal y de volumen acumulado.• Medir la recuperación de nivel de agua (cada 10 min).• Luego de estabilizar el nivel, encender la bomba a 1/3 del caudal de bombeo normal.• Medir los niveles de agua de transición en el pozo objetivo y otros pozos vecinos, en los intervalos anteriormente indicados.



Técnica	Aspectos a evaluar durante el procedimiento
	<ul style="list-style-type: none">• Leer el medidor de agua en intervalos regulares, especialmente antes de cambiar la tasa de bombeo.• Incrementar la tasa de bombeo a 2/3 del caudal de bombeo normal. Medir los niveles de agua de transición en el pozo objetivo y otros pozos vecinos, en los intervalos anteriormente indicados.• Leer el medidor de agua en intervalos regulares, especialmente antes de cambiar la tasa de bombeo.• Incrementar la tasa de bombeo al caudal de bombeo normal. Medir los niveles de agua de transición en el pozo objetivo y otros pozos vecinos, en los intervalos anteriormente indicados.• Leer el medidor de agua en intervalos regulares, especialmente antes de detener la bomba.• Apagar la bomba y medir los niveles de agua de transición durante la recuperación, hasta que el abatimiento se estabiliza. <p>Con el fin de asegurar compatibilidad, todas las pruebas se deben realizar con el mismo procedimiento, incluyendo las tasas de bombeo y los intervalos.</p>
Cálculo de capacidad específica	<p>Se estima la capacidad específica para cada etapa, considerando el nivel estático y el nivel de agua más bajo en la prueba respectiva.</p> <p>Se compara este dato con el original del pozo, como una primera interpretación.</p> <p>Se grafica el abatimiento al final de cada etapa de bombeo contra el caudal de bombeo, considerando los datos de cada etapa de prueba escalonada. Esto permite conocer las pérdidas en el funcionamiento del pozo.</p> <p>Se grafica la capacidad específica para cada etapa de bombeo contra el caudal de bombeo, considerando los datos de cada etapa de prueba escalonada. Esto permite conocer las pérdidas en el acuífero y las pérdidas por turbulencia.</p> <p>Con estos datos se puede utilizar el valor de pérdidas para comparar contra un estándar teórico, lo cual permite asegurar la condición de envejecimiento del pozo. Esto se debe repetir periódicamente para evaluar el deterioro en el tiempo.</p>
Temperatura del motor de la bomba	<p>Incrustaciones alrededor de la bomba pueden actuar como un sello térmico efectivo, disminuyendo el efecto refrigerante del agua circundante.</p>
Investigación geofísica	<p>Busca comparar la caracterización biofísica del pozo antes y después de rehabilitaciones. Típicamente contempla:</p> <ul style="list-style-type: none">• Formaciones geológicas detrás de las rejillas y en el anillo circundante si el diámetro de perforación no es significativamente mayor que el del encamisado.• Parámetros físicos y químicos del agua subterránea.• Tipo y estado del encamisado y la rejilla:<ul style="list-style-type: none">○ Espesor / corrosión y fugas.○ Daño mecánico.○ Hermeticidad de conexiones y sellos.• Tipo y estado del material de empaque del anillo circundante:<ul style="list-style-type: none">○ Presencia y posición de sellos anulares y cementación.



Fecha de entrega: 14 de mayo de 2021

N° de Versión: 01

Técnica	Aspectos a evaluar durante el procedimiento
	<ul style="list-style-type: none">○ Presencia y espesor de empaque de grava.○ Acumulación de partículas o incrustaciones en el empaque de grava.● Posición y estado de la rejilla.● Flujo en el campo de influencia inmediato del pozo, distribución del flujo sobre la rejilla.● Sedimentación en el fondo del pozo. <p>Se recomienda emplear combinación de métodos geofísicos, con el fin de optimizar el costo de los estudios y cualquier posible interferencia que pueda complicar la interpretación de resultados.</p>

Referencia: Elaboración propia con información de Houben y Treskatis (2007).