



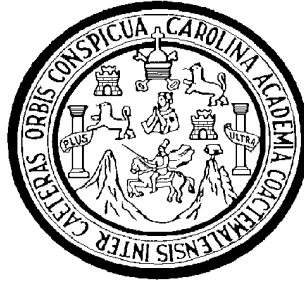
Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y
Recursos Hidráulicos ERIS.
Maestría en Ingeniería Sanitaria

**DETERMINACIÓN DE TIEMPOS ÓPTIMOS DE REMOCIÓN
DE HIERRO Y MANGANESO POR AIREACIÓN TIPO
CASCADA; UTILIZANDO TRES TIPOS DE MEDIOS DE
CONTACTO (PIEDRA VOLCÁNICA, ARCILLA Y PIEDRA
PÓMEZ).**

Katy Elizabeth López Calvillo
Asesorado por el Ing. Zenón Much

Guatemala, noviembre de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE TIEMPOS ÓPTIMOS DE REMOCIÓN
DE HIERRO Y MANGANESO POR AIREACIÓN TIPO
CASCADA; UTILIZANDO TRES TIPOS DE MEDIOS DE
CONTACTO (PIEDRA VOLCANICA, ARCILLA Y PIEDRA
PÓMEZ).**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

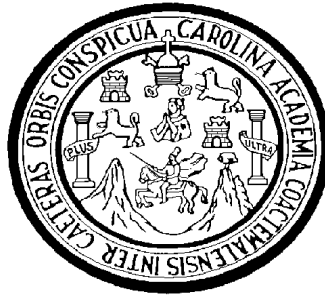
KATY ELIZABETH LÓPEZ CALVILLO

ASESORADO POR EL INGENIERO ZENON MUCH

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA SANITARIA
GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortíz de León
VOCAL V	P.A. José Alfredo Ortíz Herincx
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	M.Sc. Pedro Cipriano Saravia Celis
EXAMINADOR	Ing. Adán Pocasangre.
EXAMINADOR	Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera
EXAMINADOR	Ing. Zenon Much Santos
EXAMINADOR	Esp. Ing. Teófilo Álvarez Marroquín
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DETERMINACIÓN DE TIEMPOS ÓPTIMOS DE REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO POR AIREACIÓN TIPO CASCADA; UTILIZANDO TRES TIPOS DE MEDIOS DE CONTACTO (PIEDRA VOLCÁNICA, ARCILLA Y PIEDRA PÓMEZ),

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos ERIS, de la Facultad de Ingeniería, el 18 de noviembre de 2010.

Katy Elizabeth López Calvillo
ktycalvillo@hotmail.com

Guatemala, 29 de noviembre del 2010

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA
Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hídricos

Edificio de ERIS,
Instalaciones de Prefabricados, CII
Ciudad universitaria Zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C..A.

Tel. (502) 24188000,
Ext.86212 y 86213
(502) 24189138

Telfax (502) 24189124

www.ingenieria-usac.edu.gt

MSc. Ing. Adán Pocasangre
Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos "ERIS"
Facultad de Ingeniería, USAC

Habiendo revisado el documento titulado:

"Determinación de tiempos óptimos de remoción de hierro
y manganeso por aireación tipo cascada; utilizando tres
tipos de medios de contacto (piedra volcánica, arcilla y
piedra pómez)".

Elaborado por la Inga. en Alim. Katy Elizabeth López
Calvillo, como parte de su Estudio Especial, y como
requisito para optar al grado académico de Maestro en
Ingeniería Sanitaria, mediante la presente me permito
informarle mi satisfacción con su contenido y por lo tanto,
le comunico que dicho documento cuenta con mi
aprobación.

Agradeciendo la atención prestada a la presente, me
suscribo de usted,

Atentamente.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS".

Msc. Ing. Zenón Much Santos
Asesor del estudio



Guatemala, 29 de noviembre del 2010

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA
Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hídricos

Edificio de ERIS,
Instalaciones de Prefabricados,
CII
Ciudad universitaria Zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C..A.

Tel. (502) 24188000,
Ext.86212 y 86213
(502) 24189138

Telfax (502) 24189124

www.ingenieria-usac.edu.gt

Señores
Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
"ERIS"
Facultad de Ingeniería, USAC

Respetuosamente les comunico que he revisado la versión corregida, en mi calidad de Coordinador de la Maestría de Ingeniería Sanitaria, el trabajo de Estudio Especial titulado:

"Determinación de tiempos óptimos de remoción de hierro y manganeso por aireación tipo cascada; utilizando tres tipos de medios de contacto (piedra volcánica, arcilla y piedra pómez)".

Presentado por la estudiante,

Ingeniera en Alim. Katy Elizabeth López Calvillo

En tal virtud, manifiesto que la estudiante cumplió con los requisitos exigidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) y la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la realización de su estudio en forma satisfactoria.

Agradeciéndoles la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente.


Msc. Ing. Adán Pocasangre
Coordinador Maestría de Ingeniería Sanitaria

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA
Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hídricos

Edificio de ERIS,
Instalaciones de Prefabricados, CII
Ciudad Universitaria Zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel (502) 24188000,
Ext. 86212 y 86213
(502) 24189138

Telefax (502) 24189124

www.ingeniería-usac.edu.gt

El Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos –ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los siguientes profesores: MSc. Ing. Adán Pocasangre, MSc. Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera, MSc. Ing. Zenón Much Santos, así como el visto bueno del coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria, Ing Adán Pocasangre, y la revisión de lingüística efectuada por la licda. Rut Nohemí Cardona Mazariegos colegida Numero 12,498; y del trabajo de la estudiante: Ingeniera en Alim. Katy Elizabeth López Calvillo, Titulado:

“Determinación de tiempos óptimos de remoción de hierro y manganeso por aireación tipo cascada; utilizando tres tipos de medios de contacto (piedra volcánica, arcilla y piedra pómez)”.

En representación de la comisión de admisión y otorgamiento de grado, procede a la autorización del mismo.

Guatemala, 29 de noviembre del 2010.

IMPRIMASE

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
DIRECTOR

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos.



AGRADECIMIENTOS A

DIOS	Por guiarme, guardarme y llenarme de sabiduría para culminar satisfactoriamente este trabajo de graduación
MIS PADRES	Quienes me apoyaron y me dieron el aliento necesario para terminar el presente trabajo de graduación.
FAMILIARES	Con cariño sincero
COMPAÑEROS Y AMIGOS	Por los momentos compartidos y el apoyo incondicional.
ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA, ERIS	Por haberme brindado la oportunidad de forjarme del saber al estudiar esta nueva carrera universitaria.
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA	Por permitirme ser fruto del saber al estudiar esta carrera de nivel superior.
INSTITUTO DE FOMENTO MUNICIPAL-INFOM-UNEPAR	Por permitirme realizar la investigación en su instalación, y por el apoyo brindado por sus directivos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XIX
HIPÓTESIS.....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XIII
1. ANTECEDENTES.....	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
3. JUSTIFICACIÓN.....	7
4. ALCANCE DEL ESTUDIO.....	9
5. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	11
5.1.1. Procesos unitarios.....	11
5.1.2. Operaciones unitarias empleadas en el tratamiento de agua...	11
5.1.3. Procesos de tratamiento de agua.....	12
5.1.4. Aireación del agua.....	13
5.1.5. Aireación.....	13
5.1.6. Equipo de tratamiento de agua.....	14
5.1.7. Transferencia de gases.....	15
5.1.8. Remoción de sustancias causantes de sabores y olores.....	15
5.1.9. Principales tipos de aireadores.....	15
5.1.10. Control de proceso de aireación	17

5.1.11. Limitaciones.....	17
5.1.12. Generalidades del hierro.....	18
5.1.13. Importancia del hierro para el sanitarista.....	20
5.1.14. Generalidades del manganeso.....	21
5.1.15. Importancia del manganeso para el sanitarista.....	25
5.1.16. Generalidades del agua, aguas subterráneas y superficiales....	26
5.1.17. Rocas ígneas, arcilla y pómez.....	28
5.1.18. Granulometría de las rocas.....	30
5.1.19. Remoción del hierro y manganeso.....	31
5.1.20. Otros métodos de remoción.....	33
5.1.21. Métodos de aireación.....	35
5.1.22. Remoción del Fe y Mn por aireación.....	37
5.1.23. Especificaciones: máximos permisibles norma guatemalteca...	40
6. METODOLOGÍA.....	41
6.1. Elaboración del sistema de aireación.....	44
6.1.1. Diseño de la cascada	46
6.1.2. Sistema tipo cascada de aireación.....	47
6.1.3. Parámetros de diseño de la cascada de oxigenación...	48
6.1.4. Diagramas pilotos de las evaluaciones realizadas.....	51
7. RESULTADOS.....	55
7.1. Primera evaluación de remoción por oxidación.....	55

7.1.1. Aireación con del agua con Fe^{+2} y Mn^{+2} en contacto con piedra.	55
7.2. Segunda Evaluación de remoción por oxidación.....	57
7.2.1. Aireación con del agua con Fe^{+2} y Mn^{+2} en contacto con Arcilla.	57
7.3. Tercera evaluación de remoción por oxidación.....	61
7.3.1. Aireación con del agua con Fe^{+2} y Mn^{+2} en contacto con pómez.	61
7.4. Cuarta evaluación de remoción por oxidación	64
7.4.1. Aireación con del agua con Fe^{+2} y Mn^{+2} con aire.....	64
8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	77
CONCLUSIONES.....	85
RECOMENDACIONES.....	87
BIBLIOGRAFÍA.....	89
ANEXOS	91

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Localización del pozo	02
2. Cinética de la reacción de oxidación del manganeso.....	39
3. Diseño de la cascada	46
4. Sistema de aireación por gravedad y de recirculación mecánica.....	47
5. Esquema piloto de aireación tipo cascada con piedra volcánica como medio de contacto, para remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2}	51
6. Esquema piloto de aireación tipo cascada con arcilla como medio de contacto, para remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2}	52
7. Esquema piloto de aireación tipo cascada con piedra pómez como medio de contacto, para remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2}	53
8. Sistema de aireación tipo cascada.....	96
9. Piedra volcánica decolorada en el proceso de aireación.....	96
10. Aireación del agua con Fe^{+2} y Mn^{+2} en contacto con arcilla.....	97
11. Aireación del agua con Fe^{+2} y Mn^{+2} en contacto con piedra pómez....	97

TABLAS

I. Granulometría.....	30
II. Especificaciones Norma Guatemalteca obligatoria.....	40
III. Parámetros de diseño de la cascada de oxigenación.....	48
IV. Parámetros de oxidación de Fe y manganeso en contacto con piedra volcánica y aire.....	55

V.	Parámetros de oxidación de Fe^{+2} y Mn^{+2} en contacto con arcilla y aire..	58
VI.	Parámetros de oxidación de Fe^{+2} y Mn^{+2} en contacto con piedra pómez.	61
VII.	Parámetros de oxidación de Fe^{+2} y Mn^{+2} en contacto solo con aire.....	64
VIII.	pH del agua aireada en los cuatro sistemas evaluados.....	66
IX.	Máximos y mínimos de eficiencias de remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2}	69
X.	Eficiencias comparativas de remoción de los cuatro sistemas evaluados...	73
XI.	Tiempo óptimos de remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2}	81
XII.	Costo del proyecto.....	95

ÍNDICE DE GRÁFICAS

1.	Tiempo óptimos de remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2} por aireación en contacto con piedra Volcánica.....	56
2.	pH del agua con Fe^{+2} y Mn^{+2} durante el proceso de aireación con piedra volcánica a temperatura ambiente (25°C.).....	57
3.	Tiempo óptimos de remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2} por aireación en contacto con Arcilla.....	59
4.	pH del agua con Fe^{+2} y Mn^{+2} durante el proceso de aireación con Arcilla.....	59
5.	Tiempo óptimos de remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2} por aireación en contacto con piedra pómez.....	62
6.	pH del agua con Fe^{+2} y Mn^{+2} durante el proceso de aireación con piedra pómez.....	63
7.	Tiempo óptimos de remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2} por aireación sin ningún medio de contacto.....	65

8. pH del agua con hierro y manganeso durante el proceso de aireación sin ningún medio de contacto.....	65
9. pH del agua con hierro y manganeso aireada en contacto con tres tipos de medios de contacto.....	67
10. Eficiencias de remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2} por aireación en contacto con piedra volcánica.....	69
11. Porcentaje de remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2} por aireación con arcilla.....	71
12. Porcentaje de remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2} por aireación con pómez.....	71
13. Porcentaje de remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2} por aireación.....	72
14. Eficiencias compartidas en tres tipos de medios de contacto.....	73
15. tiempo óptimo de remoción de hierro y manganeso contenida en agua en tres tipos de medios de contacto.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Fe^{+2}	<p>Hierro. Elemento químico, en estado soluble.</p> <p>La presencia del hierro en el agua provoca precipitación y coloración no deseada. Este metal es un buen agente reductor y, dependiendo de las condiciones, puede oxidarse hasta el estado 2+m 3+ o 6+.</p>
Mn^{+2}	<p>Manganeso. Elemento químico, en estado soluble.</p> <p>El manganeso se oxida con facilidad en el aire para formar una capa castaña de óxido. También lo hace a temperaturas elevadas. En sus muchos compuestos, presenta estados de oxidación de 1+ hasta de 7+. Los estados de oxidación más comunes son 2+, 4+ y 7+.</p>

GLOSARIO

- Aireación:** Se efectúa mediante caídas de agua en escaleras, cascadas, chorros y también aplicando el gas a la masa de agua mediante aspersion o burbujeo. Se utiliza en la remoción de hierro y manganeso, y así como también de anhídrido carbónico, ácido sulfhídrico y sustancias volátiles para controlar corrosión y olores.
- Adsorción:** Consiste en la remoción de iones y moléculas presentes en la solución, concentrándolos en la superficie de un medio absorbente mediante la acción de fuerzas interfaciales. Este proceso se aplica en la remoción de olores y sabores, mediante la adición de carbón activado en polvo.
- Aguas naturales:** Agua cruda, subterránea, de lluvia, de tormenta, de tormenta residual y superficial.
- Desinfección:** Mediante la aplicación de ozono o cloro gas en la masa de agua.
- Coefficientes:** Factor numérico de un término algebraico. Un coeficiente en matemáticas es un factor multiplicativo vinculado a ciertos elementos, como una variable, un vector unitario, una función base, etcétera. Generalmente, dichos elementos y los coeficientes están indexados de la misma forma.

- Coagulación Química:** Consiste en adicionar al agua una sustancia química que tiene propiedades coagulantes, la cual transfiere sus iones a la sustancia que se desea remover neutralizando la carga eléctrica de los coloides para favorecer la formación de flóculos de mayor tamaño y peso.
- Cribado o Cernido:** Consiste en hacer pasar el agua a través de rejillas o tamices, las cuales retienen los sólidos de tamaño mayor a la separación de sus barras, como por ejemplo, ramas, palos y toda clase de residuos sólidos.
- Intercambio iónico:** Consiste en un intercambio de iones, entre la sustancia que se desea remover y un medio sólido a través del cual se hace pasar el flujo del agua. Este es el caso del ablandamiento del agua mediante resinas en el cual se realiza un intercambio de iones de calcio y magnesio por iones de sodio, al pasar el agua a través de un medio poroso constituido por zeolitas de sodio.
- Filtración:** Consiste en pasar el flujo de agua a través de un medio poroso normalmente de arena, en el cual actúan una serie de mecanismos de remoción cuya eficiencia depende de las características de la suspensión (agua más partículas), y del medio poroso. Consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso. Filtración es la operación final de clarificación que se realiza en una planta de tratamiento de agua y, por consiguiente, es la responsable principal

de producción de agua de calidad coincidente con los estándares de potabilidad.

- Flotación:** Provee condiciones de reposo, para que los sólidos cuya densidad es menor que la del agua, asciendan a la superficie de la unidad de donde son retirados por desnatado.
- Oxidación de Hierro:** Se basa en la precipitación del hierro disuelto (Fe^{2+}) en su forma oxidada (Fe^{3+}), como $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ó Fe_2O_3 . Eliminación de hierro mediante método físico-químico. Este procedimiento consiste en la oxidación del hierro con aire seguida de una filtración de arena.
- Precipitación química:** Consiste en adicionar al agua una sustancia química soluble cuyos iones reaccionan con los de la sustancia que se desea remover, formando un precipitado.
- Recarbonatación:** Aplicación para bajar el pH del agua después del ablandamiento.
- Reacción química aeróbica:** Es un proceso que requiere de la presencia del oxígeno para llevar a cabo la producción de energía.
- Sedimentación:** Consiste en promover condiciones de reposo en el agua, para remover mediante la fuerza gravitacional, las partículas en suspensión más densas que el agua.

RESUMEN

El estudio buscó evaluar un procedimiento de tratamiento que permitan la remoción de hierro y manganeso en tiempos óptimos de aireación del agua subterránea del municipio de Mixco, en donde la concentración principalmente de manganeso en el agua cruda ha llegado a ser hasta de 1.3 mg/L y en todos los casos se han obtenido concentraciones del agua tratada que cumplen con el límite máximo permisible de Hierro=(Límite máximo aceptable: 0.1 mg/L – Límite máximo permisible: 1.0 mg/L) y Manganeso=(Límite máximo aceptable: 0.05 mg/L – Límite máximo permisible: 0.5mg/L), según lo establecido por la Norma Guatemalteca Obligatoria 29001:99 de agua potable; y 0.3 mg/l de Fe y 0.05 mg/L de Mn, Norma de agua para consumo humano.

El hierro y manganeso presente en las fuentes de agua subterránea para abastecimiento público son removidas, mediante un proceso no convencional de aireación tipo cascada; sistema diseñado con cinco contenedores colocados a 0.224m de distancia uno de otro; disponiendo en su interior de medios de contacto tales como arcilla, piedra volcánica, y piedra pómez, cada una por separado para cada evaluación realizada.

Las pruebas consistieron en evaluar la remoción de hierro y manganeso por transferencia de gases a partir de la aireación al ser transportada el agua por gravedad de un contenedor a otro a una altura de 0.355 m en contacto con el aire y remoción por transferencia de iones por adsorción al entrar en contacto con los diferentes medios filtrantes.

En la pruebas realizadas con medios de contacto se obtuvieron resultados muy satisfactorios, lográndose establecer reducciones de hierro y manganeso por oxidación

por aireación, a niveles desde el un 5% hasta el 100% de eficiencia. Estableciéndose con ello los tiempos óptimos de remoción.

Las evaluaciones realizadas en el sistema de aireación tipo cascada requirió un volumen de 30 litros de agua para cada prueba con los diferentes medios de contacto; el agua utilizada contenía una concentración de manganeso que va de 0.3 a 0.7 mg /L, y de hierro desde 0.79 a 1.02.

El sistema consta de cinco escalones, en los que se dispone de un contenedor, cada uno con un medio de contacto o lecho filtrante; con las siguientes granulometrías: de 5 a 10 cm de diámetro para piedra volcánica, y de 5 a 10 mm de diámetro para la arcilla y piedra pómez.

Previo a cada arranque se requirió de un sistema de lavado, el cual garantizó la correcta aplicación de los medios de contacto, y para eliminar cualquier residuo que alterara los resultados.

Los períodos de muestreo se iniciaron a cada dos horas, y se redujeron o incrementaron a medida que se logrará obtener el 100% de remoción de hierro y manganeso; tal fue el caso de la evaluación con la piedra volcánica; la cual a las tres horas de aireación (180mm) se logró la remoción del 100% de manganeso, y un incremento del 5.06% de hierro.

Con el fin de adquirir los tiempos óptimos en los que inicia su remoción por transferencia de gases a partir de la aireación y por transferencia de iones por adsorción al entrar en contacto con los diferentes medios filtrantes; se redujeron los tiempos de muestreo durante la aireación del agua en contacto con la piedra volcánica. Para esta primera evaluación, con el fin de remover alternadamente los dos elementos químicos, se recomienda airear únicamente 90 minutos para remover solo el 26.58% de hierro y el 50% de manganeso.

La arcilla removió 74.68% de hierro y 100% de manganeso a los 720 minutos de aireación.

La piedra pómez removió el 4.95% de hierro y el 85.71% de manganeso a los 666 minutos de aireación.

La última aireación sin medio de contacto removió un máximo de **100%** y un promedio de 64.3 % de manganeso; remoción que no se logro en el hierro en donde se incrementó su concentración a 59.4% de la concentración inicial aireándolo por 420 minutos.

De los tres medios de contacto la arcilla es la mejor alternativa de remoción de hierro y manganeso, siendo la eficiencia para ambos elementos, mayor al 70% de remoción por oxidación en contacto con el oxígeno durante 720 minutos de aireación en el sistema tipo cascada.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar tiempos óptimos de remoción de hierro y manganeso del agua del pozo de Alamedas Yumar de Mixco, Guatemala; a través de la oxidación por transferencia de gases a partir de la aireación en un sistema convencional tipo cascada y por transferencia de iones por adsorción al entrar en contacto de forma alternada con los tres diferentes medios de contacto (piedra volcánica, piedra pómez y arcilla).

● Objetivos específicos

1. Evaluar la eficiencia de remoción del hierro y manganeso en contacto con piedra volcánica, y determinar el tiempo óptimo en el que se logró la mayor remoción de Fe y Mn, con estas condiciones.
2. Evaluar la eficiencia de remoción del hierro y manganeso en contacto con Arcilla, y determinar el tiempo óptimo en el que se logró la mayor remoción de Fe y Mn, con estas condiciones.
3. Evaluar la eficiencia de remoción del hierro y manganeso en contacto con piedra Pomez, y determinar el tiempo óptimo en el que se logró la mayor remoción de Fe y Mn, con estas condiciones.
4. Establecer parámetros de referencia evaluando el sistema sin medio de contacto.

HIPÒTESIS

Las eficiencias de remoción de Hierro y Manganeseo del agua de un pozo de Mixco Guatemala; al entrar en contacto con el aire y con tres diferentes medios de contacto (piedra volcánica, arcilla y pómez) se encuentran en función del tiempo de aireación y exposición/contacto.

INTRODUCCIÓN

El hierro y el manganeso disueltos se encuentran principalmente presentes en aguas subterráneas localizadas en terrenos pizarrosos o aluvionales¹⁸.

Cuando aguas que contienen estos metales son bombeadas de pozos a reservorios se libera anhídrido carbónico e hidrógeno sulfurado, resultando en un aumento de pH del agua. Las formas más comunes del hierro y manganeso solubles son las de bicarbonatos¹⁸.

Varios estudios realizados en la Escuela de Ingeniería Sanitaria de Guatemala, C.A., sobre la remoción de hierro y manganeso han sido basados en la remoción por coagulación, filtración rápida con lecho de arena y arena sílice; por intercambio catiónico y por filtración de contacto; pero no existen registros de evaluación experimental para remoción de estos dos elementos químicos contenidos en el agua por medio de aireación por oxidación, a través de transferencia de gases a partir de la aireación y por transferencia de iones por medio de la adsorción al entrar en contacto con los diferentes medios filtrantes, como se expone en el presente informe.

El estudio se orientó a caracterizar tres tipos de medios de contacto que intervinieron en el proceso de aireación de agua con concentraciones elevadas de hierro y manganeso a partir de un ensayo experimental a pequeña escala. El cual fácilmente puede ser aprovechado para la remoción del hierro y manganeso del agua del pozo de alamedas Yumar en Mixco, por su facilidad de construcción, y por la facilidad de adquisición de los medios filtrantes.

Este sistema expone el agua cruda con Fe, y Mn, ante la aireación, para remover los contaminantes por medio de oxidación, por transferencia de gases a partir de la aireación y por transferencia de iones por adsorción al entrar en contacto con los diferentes medios filtrantes.

Las tecnologías estudiadas corresponden al sistema de aireación tipo cascada; operando con agua subterránea, que contenían concentraciones fuera de especificaciones de hierro y manganeso. (Concentraciones del agua= 1.02 mg/L Fe y 0.7 mg/L Mn) (Especificaciones según norma guatemalteca: Fe <1.0 Mn < 0.5 mg/L). El hierro y manganeso frecuentemente es una causa de problemas en sistemas de abastecimiento de agua potable alimentados por aguas subterráneas. En general no representan peligro para la salud humana, sin embargo generan problemas de sabor, color y olor en el agua suministrada, acumulación de hierro y manganeso en las redes de distribución, manchas en accesorios sanitarios y depósitos de almacenamiento de agua de las viviendas y en cualquier utensilio o ropa que sea lavado con agua con presencia excesiva de estos minerales.

En Guatemala, y en el mundo gran parte de las fuentes de abastecimiento de agua subterránea se ven afectadas por la presencia de hierro y manganeso, los cuales se encuentran en forma soluble y al oxidarse, ya sea al momento de la cloración o por contacto con el oxígeno del aire se precipitan, generando un color oscuro que provoca el rechazo de los consumidores, ya que manchan la ropa, obstruyen tuberías, accesorios y bombas. Hasta el momento no se conocen efectos nocivos para la salud producidos por estos elementos, sin embargo, las concentraciones elevadas de manganeso pueden acelerar el crecimiento biológico en los sistemas de distribución y contribuir a los problemas de sabor y olor en el agua. Así mismo aumentan la demanda de cloro y otros oxidantes aplicados en la desinfección.

Los principales métodos utilizados para removerlos del agua son la aireación, precipitación química y filtración, aunque también existen otros, dependiendo de la concentración y forma en que el hierro y manganeso se encuentren presentes en el agua, así será el tipo de tratamiento recomendado.

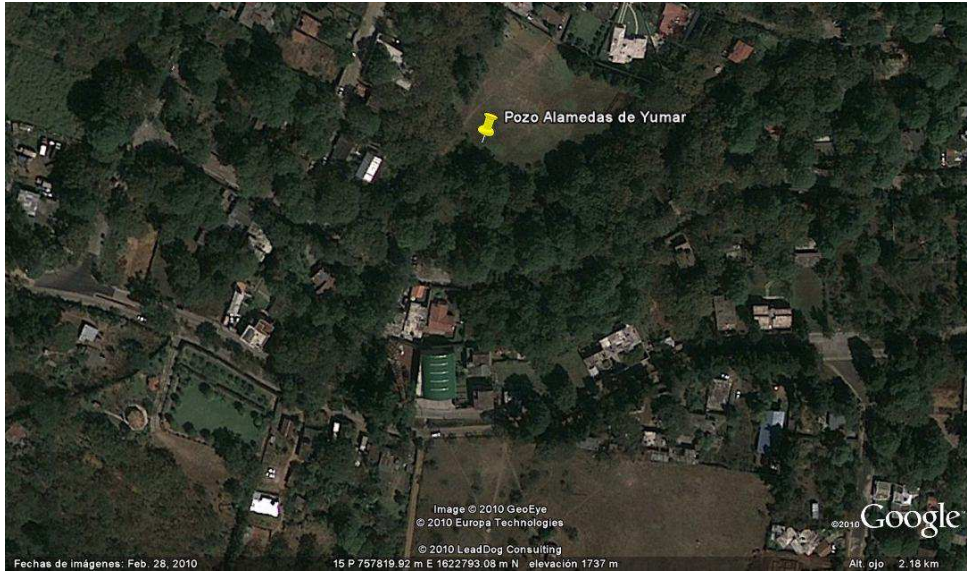
En este trabajo se desarrolla un procedimiento experimental a pequeña escala que permite establecer los tiempos óptimos de remoción de hierro y manganeso del agua subterránea de Mixco.

1. ANTECEDENTES

El hierro y manganeso presentes en las fuentes de agua subterráneas para abastecimiento público son removidas mediante un proceso no convencional de adsorción que utiliza zeolita natural tipo clinoptilolita recubierta con óxidos de manganeso, el cual se ha investigado en diversos lugares del país, tales como Guaymas, Navojoa, como Veracruz, Zihuatanejo; Texcoco, Estado de México; Iztapalapa, ciudad de México; Culiacán, Sinaloa y Camargo, Chihuahua; y utilizando los diferentes medios de coagulación, sedimentación, ablandamiento y filtración, y aireación en todo México, Perú, Brasil y Chile entre otros países. Pero una investigación de intercambio iónico por adsorción al entrar en contacto con medios filtrantes como piedra volcánica, arcilla y piedra pómez, y por transferencia de gases por remoción del Fe^{+2} y Mn^{+2} por aireación no se tienen antecedentes de un estudio similar en la Escuela de Ingeniería Sanitaria, ERIS.

La ubicación del proyecto en estudio sobre la oxidación de hierro y manganeso contenida en el agua de fuentes subterráneas de los pozos del municipio de Mixco, Guatemala; se realizó en los laboratorios de Química y Microbiología sanitaria de la Escuela regional de Ingeniería Sanitaria; y en el Instituto de Fomento municipal INFOM-UNEPAR; ubicado en las siguientes coordenadas:
Coordenadas UTM: 15 P – 764,875 E – 1,618,934 N
Coordenadas geográficas: 14° 37' 51.07" N, 90° 32' 27.77" O

FIGURA: 1 Localización del pozo: donde se obtuvo el agua con concentraciones altas de Fe y manganeso. Alamedas de Yumar: Mixco Guatemala. Pozo Alamedas de Yumar. Coordenadas UTM: 15P - 757,814E - 1,622,869 N Coordenadas Geograficas: 14° 40' 1.53" N, 90° 36' 22.21" O



Gran parte de las fuentes de abastecimiento del país se ven afectadas por la alta concentración de Hierro y Manganeso. La problemática es muy común tanto en agua superficial como en la subterránea.

Tanto el hierro como el manganeso crean serios problemas en los abastecimientos públicos de agua. Los problemas son más extensos y críticos con aguas subterráneas, pero también se encuentran dificultades en ciertas estaciones del año en aguas extraídas de algunos ríos y de abastecimientos superficiales estancados.

El hierro existe en suelos y minerales principalmente como óxido férrico insoluble y sulfuro de hierro (pirita). En algunas áreas también se presenta como carbonato ferroso (siderita), que es muy ligeramente soluble. Puesto que las aguas subterráneas por lo general contienen grandes cantidades de dióxido de carbono: $\text{FeCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{+2} + 2\text{HCO}_3$.

El manganeso existe en el suelo principalmente como dióxido de manganeso, que es muy insoluble en agua que contiene dióxido de carbono. En condiciones

reductoras (anaeróbicas), el manganeso en forma de dióxido es reducido de un estado de oxidación IV a un estado II, y se hace soluble, como ocurre con los óxidos férricos.

La norma vigente para agua para consumo humano según NGO 29 001:99 limita la concentración de hierro a 0.3 mg/L y la del manganeso a 0.05 mg/L; y AGUA POTABLE NGO29001:99 0.1 a 1 mg/l de hierro, y de 0.05 a 0.5 de manganeso.

La remoción de hierro y manganeso en la práctica se efectúa a través de una de las siguientes técnicas: aireación, aireación y cloración, oxidación con kmno_4 , proceso con zeolita de manganeso y kmno_4 . Aeración y/o oxidación química - filtración por arena o arena y antracita, tratamiento convencional combinado con ablandamiento, estabilización por secuestro, intercambio iónico operando a ciclo de filtración por "greensand", control de hierro y manganeso *in situ*.

Este estudio abarcará únicamente la evaluación experimental a pequeña escala de la remoción de hierro y manganeso por aireación.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existe una relación entre el tiempo y eficiencias de remoción de hierro y manganeso del agua de un pozo de Mixco Guatemala; al entrar en contacto con el aire y con tres diferentes medios de contacto?

Palabras Clave

La oxidación es la combinación con el oxígeno. Reacción en la que un átomo o un ión pierden electrones.

Los coeficientes de oxidación son los tiempos ideales para la remoción de hierro y manganeso, mediante aireación.

Hierro, manganeso, agua subterránea, concentraciones de hierro y manganeso, eficiencias, remoción, especificación, tiempos de aireación, medios de contacto, adsorción, transferencia de gases.

Agua potable, calidad del agua, optimización, oxidación, remoción, aireación, adsorción, transferencia de gases, tiempo.

3. JUSTIFICACIÓN

Debido a las diversas actividades del ser humano (agrícolas, ganaderas, industriales, recreacionales, etc.), han traído como consecuencia la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas; principalmente con sustancias químicas y microbiológicas, además del deterioro de sus características estéticas. Esto implica la necesidad de someter el agua a una serie de procesos u operaciones unitarias, para potabilizarla, a fin de que pueda ser utilizada como fuente para consumo humano.

Hoy día y en el futuro, y como consecuencia de la contaminación creciente que inciden de forma perjudicial en la salud de los consumidores de agua potable (por pesticidas, detergentes, subproductos de la desinfección y otras sustancias orgánicas e inorgánicas; algunas fuentes de agua suelen contener cantidades altas de Hierro y manganeso; como el caso de Mixco, Guatemala; debido a ello surge la necesidad de buscar alternativas que se provean medios de soporte para la remoción de estos elementos químicos en el agua para potabilizarla.

Para suplir esta necesidad, se presenta como alternativa un diseño de aireadores por gravedad para hacer circular de forma mecánica el agua con hierro y manganeso y someterla a tener contacto con el aire, en un sistema tipo cascada, para aprovechar las diferencias de nivel que pueda ser utilizadas en cualquier comunidad; en donde solo hay que aplicar fuerza de gravedad, existen los tipos de cascada, planos inclinados, de columnas verticales y de columnas de charolas o canales perforados; pero se utilizará el de cascada para provocar que el agua entre en contacto con un medio filtrante. Esta técnica se selecciono por ser muy económica, ya que los materiales de contacto son de fácil acceso en las comunidades rurales.

Remover el manganeso del agua es difícil, se requiere elevar el pH sobre 9.0 y extremar su oxidación (algunas 60 veces más que la oxidación requerida para la remoción de otros metales). En los sistemas tradicionales, la oxidación del

manganeso puede necesitar un tiempo de residencia de 60 minutos a pH 9.5 y $O_2=1$. Dichos tratamientos son costosos, en términos de tiempo, químicos y por supuesto, económicos.

Este sistema propuesto no requiere de ningún químico, para proporcionar estas condiciones ideales, sino se utilizará las condiciones naturales (aire, agua con Fe y Mn, y medios de contacto: piedra volcánica, pómez, y arcilla); los cuales por sus propiedades y características fisicoquímicas, le conferirán la propiedad y condiciones de incrementar el pH para su mejor remoción.

4. ALCANCES DEL ESTUDIO

El alcance de este estudio, comprende unicamente determinar los tiempos óptimos de remoción del 50% del hierro y manganeso del agua cruda subterránea de pozos del municipio de Mixco, Guatemala, por oxidación por transferencia de gases a partir de la aireación en un sistema convencional tipo cascada y por transferencia de iones por adsorción al entrar en contacto de forma alternada con los tres diferentes medios de contacto (piedra volcánica, piedra pómez y arcilla).

No se pretende abarcar ninguna otra característica física, química, y microbiológica del agua que pueda verse afectada durante la evaluación de las variables a investigar.

5. MARCO TEÒRICO

PROCESOS UNITARIOS ² :

Una operación unitaria es un proceso químico, físico o biológico, mediante el cual las sustancias objetables contenidas en el agua, son removidas o transformadas en sustancias inocuas.

La mayor parte de los procesos, originan cambios en la concentración, o en el estado de una sustancia específica, la cual es desplazada o incorporada en la masa de agua, fenómeno que recibe el nombre de transferencia de fase, como por ejemplo la introducción de oxígeno al agua (transferencia de la fase gaseosa a la líquida), o la liberación de anhídrido carbónico contenido en el agua (transferencia de la fase líquida a la gaseosa), mediante el proceso de aireación.

Operaciones Unitarias empleadas en el tratamiento del agua.

Los procesos de transferencia empleados en el tratamiento del agua para consumo humano son principalmente los de:

- ✓ Transferencia de sólidos (procesos de cribado, sedimentación, flotación, y filtración).
- ✓ Transferencia de iones (mediante procesos de coagulación, precipitación química, adsorción e intercambio iónico.)
- ✓ Transferencia molecular o de nutrientes. (Es el proceso de purificación natural del agua, las bacterias saprofitas degradan la materia orgánica transformando sustancias complejas en material celular vivo, o en sustancias más simples y estables, incluyendo los gases de descomposición.
- ✓ Transferencia de gases. Consiste en cambiar la concentración de un gas en el agua. (Por aireación, desinfección, y recarbonatación).

2.Manual de la Cepis. Capítulo 3, procesos unitarios y plantas de tratamiento. Ing. Lidia de Vargas. Pág. 108

Este último proceso de aireación (transferencia de gases) y adsorción (Transferencia de iones); son los dos parámetros a los que expondrá el agua para remover hierro y manganeso en este estudio.

Los objetivos del tratamiento para mejorar la calidad del agua de abastecimiento son de los siguientes tipos:

Higiénico: remover bacterias y elementos venenosos o nocivos, así como resolver la mineralización excesiva y las concentraciones elevadas de compuestos orgánicos, protozoarios y otros microorganismos.

Estético: corregir el color, la turbidez, el olor y el sabor.

Económico: reducir la corrosividad, la dureza, el color, la turbidez; reducir las concentraciones de hierro y manganeso; resolver problemas de olor y sabor, entre otros.

PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUA ²

Los procesos de tratamiento son los siguientes: Aireación, coagulación, floculación, decantación o sedimentación, filtración, tratamiento por contacto, corrección de la dureza, desinfección, control de la corrosión y cloración, control del sabor y olor.

Este estudio comprende únicamente el proceso de tratamiento por aireación, la cual se efectúa mediante caídas de agua en escaleras, cascadas, chorros o también aplicando el gas a la masa de agua mediante aspersion o burbujeo. Se utiliza en la remoción de hierro y manganeso, y así como también de anhídrido carbónico, ácido sulfhídrico y sustancias volátiles para controlar corrosión y olores.

2.Manual de la Cepis. Capítulo 3, procesos unitarios y plantas de tratamiento. Ing. Lidia de Vargas. Pág. 108

AIREACIÓN DEL AGUA¹

La aeración es el proceso de tratamiento mediante el cual se incrementa el área de contacto del agua con el aire, para facilitar el intercambio de gases y sustancias volátiles.

La aeración se realiza por tres razones:

- 1) Remoción de gases disueltos:
 - a) Gas carbónico presente en el agua en forma natural;
 - b) Gas sulfhídrico proveniente de la putrefacción o fermentación de los depósitos orgánicos putrescibles o fermentables del fondo de los reservorios;
 - c) Cloro en exceso (proveniente de la supercoloración).

- 2) Introducción del oxígeno del aire en el agua:
 - a) Para oxidar el hierro y el manganeso, cuya remoción se realiza mediante la decantación y filtración (de esta manera también se reduce el sabor debido al hierro y al manganeso);
 - b) Para añadir oxígeno en el agua hervida o destilada.

AEREACIÓN:¹

La aireación es el proceso mecánico por el cual se procura un contacto íntimo del aire con el agua. Aplicada al tratamiento de agua, la aireación transfiere moléculas gaseosas, principalmente oxígeno, del aire (fase gaseosa) al agua (fase líquida). Aunque a menudo la meta es disolver oxígeno en agua, la aireación incluye también la remoción del agua de gases indeseables, como CO₂ y metanol este proceso se cita algunas veces como desgasificación.

La aireación está acompañada de otros procesos o reacciones, que pueden ser de naturaleza física, química o bioquímica.

1. Manual del agua. Nalco Chemical company. Frank N. Jemmer John McCallion. Tomo II1989. Mc GRAW-HILL interamericana de México S.A. Sección 16-1

El uso de la aireación se encuentra en el campo de la oxidación bioquímica de desechos orgánicos, domésticos o industriales. Pero aireación también se usa ampliamente para la oxidación de impurezas inorgánicas como, por ejemplo, hierro, manganeso y sulfuro de hidrógeno, y para la remoción u oxidación de impurezas volátiles causantes de olor o mal sabor. La aireación cuyo objetivo es aumentar sólo el contenido de oxígeno en el agua se lleva a cabo algunas veces en el último paso en una de tratamiento de agua o de desecho.

Equipo:

En el tratamiento de agua dulce, los aireadores por gravedad y los aireadores por rocío han sido tradicionalmente usados para remover hierro, y manganeso y sulfuro de hidrógeno. Las técnicas de aireación desarrolladas para el tratamiento de aguas de desecho son aplicables también al agua dulce, aunque los requerimientos de capacidad son por lo general mayores.

Los aireadores por gravedad o en cascada se asemejan a menudo a torres de enfriamiento, ya que el agua es bombeada por la parte superior y se la hace caer en cascada sobre unas tabletas de madera hasta que son recogidas en un pozo o estanque.

El aireador de aspiración forzada es semejante a una torre de enfriamiento en cuanto a que se fuerza aire hacia arriba contra un flujo de agua sobre tablas de madera.

El aireador empacado de coque, también una unidad de reflujo por gravedad, es popular en las instalaciones de remoción de hierro y manganeso en virtud de su simplicidad.

Transferencia de gases²

Consiste en cambiar la concentración de un gas que se encuentra incorporado En el agua mediante procesos de aireación, desinfección y recarbonatación.

• Aireación

La aireación se efectúa mediante caídas de agua en escaleras, cascadas, chorros y también aplicando el gas a la masa de agua mediante aspersion o

• Burbujeo.

Se usa en la remoción de hierro y manganeso, así como también de anhídrido carbónico, ácido sulfhídrico y sustancias volátiles, para controlar la corrosión y olores.

Remoción de sustancias causantes de sabores y olores:

- a) Sustancias oleaginosas provenientes de algas y otros organismos (Cuando son volátiles);
- b) Gas sulfhídrico;
- c) Sabores debidos al hierro y al manganeso;
- d) descomposición de la materia orgánica (quema).

Cuando se remueve el gas carbónico o se reduce la tendencia corrosiva del agua y el consumo de álcalis, se obtiene un aumento del pH.

En la práctica, es imposible la reducción por aeración de todo gas carbónico presente en el agua, debido a que el gas carbónico del aire también puede disolverse.

La remoción del gas sulfhídrico por aeración es lo suficientemente eficaz para reducir los olores, sabores y demanda de cloro.

2. Manual de la Cepis. Capítulo 3. Procesos unitarios y plantas de tratamiento. Ing. L. de Vargas. Pág. 108

Principales tipos de aireadores³

1) Aireadores de gravedad: son los siguientes:

a) Aireadores de cascada: el principio general consiste en esparcir el agua al máximo y dejarla correr sobre obstáculos para producir turbulencia. La estructura más simple es la de escaleras, las cuales esparcen el agua y permiten la caída de un nivel a otro.

b) Aireadores de bandejas: consisten en una serie de bandejas con hendiduras o perforaciones o con un fondo de malla de alambre sobre las cuales se distribuye el agua para que caiga en un tanque de recolección. Algunos aireadores de este tipo están dotados de un lecho grueso de trozos de carbón o bolas de cerámica, cuyo espesor varía de 5 a 15 centímetros y que se coloca en las bandejas para lograr mayor eficacia y producir mayor turbulencia. Los lechos gruesos son eficaces, especialmente cuando se utilizan como auxiliares catalizadores de las reacciones de oxidación, para causar la precipitación del óxido de hierro y el manganeso (pirolusita).

c) Aireadores de aire difuso: por lo general, son tanques rectangulares de concreto con tubos perforados o placas porosas u otros dispositivos que se encuentran cerca del fondo y a través de los cuales el aire comprimido se inyecta en el sistema. Como resultado, se producen burbujas de aire que aumentan el contacto entre el agua y el aire.

La cantidad de aire que se requiere depende de la finalidad de la aeración.

d) Aireadores de aspersion: están compuestos por boquillas colocadas en un tubo de distribución. Los aireadores de aspersion poseen un valor estético y agradan al público (son fuentes luminosas). Necesitan un área grande y por ello no son económicos. Son los aireadores más eficaces para el intercambio de gases y sustancias volátiles.

3. Manual de la Cepis. ASPECTOS FISICOQUÍMICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA. Capítulo 1 Quím. Ada Barrenechea Martel. Página 33 -34

Control del proceso de aireación

El control del proceso de aeración consiste en determinar la concentración de oxígeno disuelto, gas carbónico libre, gas sulfhídrico y el valor del pH.

El proceso de aireación tendrá éxito si se cumplen las siguientes tres condiciones simultáneamente:

- Cuando la concentración de oxígeno disuelto está entre 7 y 10 ppm;
- Cuando la concentración de gas carbónico se ubica entre 3 y 5 ppm;
- Cuando hay ausencia total de gas sulfhídrico.

Limitaciones³

El oxígeno que se incorpora al agua durante el proceso de aeración puede volverla más corrosiva y formar, con el hierro de la tubería, tubérculos que reducen su diámetro y su capacidad de escurrimiento. Por ello, la aeración no se debe utilizar indiscriminadamente sino solo cuando las finalidades están controladas. La aeración no siempre es un método eficaz para la remoción o reducción de los sabores y olores debido a que muchas de las sustancias que causan estas características indeseables no son suficientemente volátiles. Por ejemplo, los aceites esenciales de las algas.

3. Manual de la Cepis. ASPECTOS FISICOQUÍMICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA. Capítulo 1 Quím. Ada Barrenechea Martel. Página 33 -34

Generalidades del hierro³

El hierro es un constituyente normal del organismo humano (forma parte de la hemoglobina). Por lo general, sus sales no son tóxicas en las cantidades comúnmente encontradas en las aguas naturales.

Propiedades químicas

El hierro es un elemento químico de número atómico 26 situado en el grupo 8, periodo 4 de la tabla periódica de los elementos. Su símbolo es Fe (del latín fĕrrum) y tiene una masa atómica de 55,6 u.

Este metal de transición es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre, representando un 5% y, entre los metales.

Categoría: Compuestos de hierro

- Los estados de oxidación más comunes son +2 y +3. Los óxidos de hierro más conocidos son el óxido de hierro (II), FeO , el óxido de hierro (III), Fe_2O_3 , y el óxido mixto Fe_3O_4 .

Forma asimismo numerosas sales y complejos en estos estados de oxidación.

Cuando el hierro se encuentra dentro de unos niveles normales, los mecanismos antioxidantes del organismo pueden controlar este proceso.

La dosis letal de hierro en un niño de dos años es de unos 3 g. 1 g puede provocar un envenenamiento importante. El hierro en exceso se acumula en el hígado y provoca daños en este órgano.

Los óxidos de hierro son compuestos químicos formados por hierro y oxígeno. Se conocen 16 óxidos de hierro. Estos compuestos son óxidos (hematita, magnetita, maghemita), o hidróxidos y oxihidróxidos (goetita, lepidocrocita, akaganeíta, feroxihita, FeOOH , $\text{FeO}(\text{OH})$ de alta presión, ferrihidrita, bernalita, $\text{Fe}(\text{OH})_2$).

3. Manual de la Cepis. ASPECTOS FÍSICOQUÍMICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA. Capítulo 1 Quím. Ada Barrenechea Martel. Página 33 -34

Algunos de estos óxidos son utilizados en cerámica, particularmente en vidriados. Los óxidos de hierro, como los óxidos de otros metales, proveen el color de algunos vidrios después de ser calentados a altas temperaturas. También son usados como pigmento.

Óxidos de hierro¹⁶

- Óxido de hierro (II) u óxido ferroso (FeO). El polvo de óxido ferroso puede causar explosiones ya que literalmente entra en combustión.
- Óxido de hierro (III) u óxido férrico (Fe_2O_3). En su estado natural es conocido como hematita. También es purificado para su uso como soporte de almacenamiento magnético en audio e informática. Esta es la forma de óxido comúnmente vista en hierros y estructuras de acero oxidadas que ataca desde puentes hasta carrocerías de automóviles, la cual es tremendamente destructiva.
- Óxido de hierro (II, III) u óxido ferroso férrico (Fe_3O_4). En su estado natural es conocido como magnetita, un mineral de color negruzco que constituye una de las fuentes principales de obtención de hierro. Esta forma de óxido tiende a ocurrir cuando el hierro se oxida bajo el agua y por eso es frecuente encontrarlo dentro de tanques o bajo la línea de flotación de los barcos.

Hidróxidos de hierro

- Hidróxido de hierro (II) $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Es de color verduzco (green rusts)
- Hidróxido de hierro (III) $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Es de color marrón oscuro.
- Oxihidróxido de hierro (III) $\text{FeO}(\text{OH})$. En su estado natural se conoce como goetita. Es de color rojo amarronado. También se lo encuentra conformando los siguientes minerales: siderogel, limonita y feroxihita; además de existir una variante conocida como lepidocrocita.

16. Recopilado de internet en : <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/011938/011938-03.pdf>

IMPORTANCIA PARA EL SANITARISTA

La presencia de hierro puede afectar el sabor del agua, producir manchas indelebiles sobre los artefactos sanitarios y la ropa blanca. También puede formar depósitos en las redes de distribución y causar obstrucciones, así como alteraciones en la turbiedad y el color del agua.

Tiene gran influencia en el ciclo de los fosfatos, lo que hace que su importancia sea muy grande desde el punto de vista biológico. En la naturaleza se presenta en dos formas: asimilable y no asimilable.

En las aguas superficiales, el hierro puede estar también en forma de complejos organoférricos y, en casos raros, como sulfuros. Es frecuente que se presente en forma coloidal en cantidades apreciables.

Las sales solubles de hierro son, por lo general, ferrosas (Fe II) y la especie más frecuente es el bicarbonato ferroso: $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$.

Este metal en solución contribuye con el desarrollo de microorganismos que pueden formar depósitos molestos de óxido férrico en la red de distribución.

Por consideraciones de sabor y debido a que los tratamientos convencionales pueden eliminar el hierro en estado férrico pero no el hierro soluble Fe (II), las guías de calidad de la OMS y del Canadá recomiendan que en las aguas destinadas al consumo humano no se sobrepase 0,3 mg/L de hierro.

5. Fe y Mn. Romero Rojas, Jairo Alberto. 2da. edición Editorial Alfa Omega . México 1999.

Generalidades del manganeso⁵

El manganeso es un elemento esencial para la vida animal; funciona como un activador enzimático. Sin embargo, grandes dosis de manganeso en el organismo pueden causar daños en el sistema nervioso central.

Su presencia no es común en el agua, pero cuando se presenta, por lo general está asociado al hierro. Comúnmente se encuentra en el agua bajo su estado reducido, Mn (II), y su exposición al aire y al oxígeno disuelto lo transforma en óxidos hidratados menos solubles.

PROPIEDADES QUÍMICAS

Los estados de oxidación más bajos se encuentran en compuestos carbonílicos. Para el manganeso el estado de oxidación ⁺² es el más estable, frecuente y característico. Todos los estados de oxidación superiores son agentes oxidantes energéticos. Los estados de oxidación ⁺³ y ⁺⁶ tienen tendencia a la desproporción.

Sus estados de oxidación más comunes son ⁺², ⁺³, ⁺⁴, ⁺⁶ y ⁺⁷, aunque se han encontrado compuestos con todos los números de oxidación desde ⁺¹ a ⁺⁷ los compuestos en los que el manganeso presenta estado de oxidación ⁺⁷ son agentes oxidantes muy enérgicos. Dentro de los sistemas biológicos, el catión Mn⁺² compite frecuentemente con el Mg⁺². Se emplea sobre todo aleado con hierro en aceros y en otras aleaciones.

El manganeso es elemento químico, símbolo Mn, de número atómico 25 y peso atómico 54.938, situado en el grupo 7 de la tabla periódica de los elementos y se simboliza como Mn. Es uno de los metales de transición del primer periodo largo de la tabla periódica; se encuentra entre el cromo y el hierro.

5. Fe y Mn. Romero Rojas, Jairo Alberto. 2da. edición Editorial Alfa Omega . México 1999.

Tiene propiedades en común con ambos metales. Aunque poco conocido o usado en su forma pura, reviste gran importancia práctica en la fabricación de acero.

Se encuentra como elemento libre en la naturaleza, a menudo en combinación con el hierro y en muchos minerales. Como elemento libre, el manganeso es un metal con aleación de metales industriales con importantes usos, sobre todo en los aceros inoxidables.

El manganeso se oxida con facilidad en el aire para formar una capa castaña de óxido. También lo hace a temperaturas elevadas. A este respecto su comportamiento es más parecido a su vecino de mayor número atómico en la tabla periódica (el hierro), que al de menor número atómico, el cromo.

El fosfatado de manganeso¹⁵ se utiliza como tratamiento para la prevención de la oxidación y corrosión del acero. Dependiendo de su estado de oxidación, los iones de manganeso tienen colores diferentes y se utilizan industrialmente como pigmentos. Los permanganatos alcalinos y de metales alcalinotérreos son oxidantes poderosos. El dióxido de manganeso se utiliza como cátodo.

Los iones de manganeso funcionan como cofactores de una serie de enzimas en los organismos superiores, donde son esenciales en la desintoxicación de los radicales libres de superóxido. El elemento es una huella que requiere mineral para todos los seres vivos conocidos. En cantidades mayores, y al parecer con una actividad mucho mayor por la inhalación, el manganeso puede causar un síndrome de intoxicación en los mamíferos, con daños neurológicos que a veces son irreversibles.

El manganeso es un metal de transición blanco grisáceo, parecido al hierro. Es un metal duro y muy frágil, refractario y fácilmente oxidable. El manganeso metal puede ser ferromagnético, pero sólo después de sufrir un tratamiento especial.

15. <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/mn.htm#ixzz12aUZUBIh>

Óxido de manganeso.

El permanganato de potasio, KMnO_4 , es un reactivo de laboratorio muy común debido a sus propiedades oxidantes.

El dióxido de manganeso, MnO_2 se emplea como despolarizador en pilas secas. También se puede usar para decolorar vidrio que presente color verde debido a la presencia de trazas de hierro. Este óxido también se emplea para dar color amatista al vidrio, y es responsable del color de la amatista (una variedad del cuarzo). Además, se utiliza en la producción de cloro y oxígeno. Algunas monedas de Aluminio contienen Manganeso como aleación.

Precauciones

El manganeso es un elemento esencial, siendo necesario un aporte de entre 1 a 5 mg por día, cantidad que se consigue a través de los alimentos.

El manganeso en exceso es tóxico. Exposiciones prolongadas a compuestos de manganeso, de forma inhalada u oral, pueden provocar efectos adversos en el sistema nervioso, respiratorio, y otros.

El permanganato de potasio, KMnO_4 , es corrosivo.

Efectos del manganeso sobre la salud ⁸

El Manganeso es un elemento esencial para la salud de los humanos la falta de este, puede también causar efectos sobre la salud. Estos son los siguientes efectos:

- Engordar
- Intolerancia a la glucosa
- Coágulos de sangre
- Problemas de la piel
- Bajos niveles de colesterol

8. Guía para la calidad del agua potable Volumen 2 . Criterios relativos a la salud y OPS. Organization Panamericana de la Salud Vol 2 1987. Página 288.

- Desorden del esqueleto
- Defectos de nacimiento
- Cambios en el color del pelo
- Síntomas neurológicos

Los efectos del manganeso mayormente ocurren en el tracto respiratorio y el cerebro. Los síntomas por envenenamiento con Manganeso son alucinaciones, olvidos y daños en los nervios. El manganeso puede causar parkinson, embolia de los pulmones y bronquitis.

Cuando los hombres se exponen al manganeso por un largo periodo de tiempo el daño puede llegar a ser importante.

Un síndrome que es causado por el manganeso tiene los siguientes síntomas: esquizofrenia, depresión, debilidad de músculos, dolor de cabeza e insomnio.

Efectos ambientales del manganeso ⁸

Los humanos aumentan las concentraciones de manganeso en el aire por las actividades industriales y a través de la quema de productos fósiles. El Manganeso que deriva de las fuentes humanas puede también entrar en la superficie del agua, aguas subterráneas y aguas residuales. A través de la aplicación del Manganeso como pesticida el Manganeso entrará en el suelo.

Para los animales el Manganeso es un componente esencial sobre unas 36 enzimas que son usadas para el metabolismo de carbohidratos, proteínas y grasas.

8. Guía para la calidad del agua potable Volumen 2 . Criterios relativos a la salud y OPS. Organization Panamericana de la Salud Vol 2 1987. Página 288.

IMPORTANCIA PARA EL SANITARISTA ⁵

En concentraciones mayores a 0,15 mg/L, las sales disueltas de manganeso pueden impartir un sabor desagradable al agua.

La presencia de manganeso en el agua provoca el desarrollo de ciertas bacterias que forman depósitos insolubles de estas sales, debido a que se convierte, por oxidación, de manganeso en solución al estado mangánico en el precipitado. Esta acción es similar en el hierro.

Las guías de calidad para aguas de consumo humano de la OMS establecen como valor provisional 0,5 mg/L, pero las Guías de Calidad para Agua de Bebida del Canadá recomiendan una concentración diez veces menor: 0,05 mg/L, por consideraciones principalmente relacionadas con el sabor y el olor del agua.

5. Fe y Mn. Romero Rojas, Jairo Alberto. 2da. edición Editorial Alfa Omega . México 1999.

EL AGUA ¹¹

El agua es un solvente universal, debido a que es capaz de disolver o dispersar la mayoría de sustancias con las que tiene contacto, sean estas sólidas, líquidas o gaseosas, y de formar con ellas iones, complejos solubles e insolubles, coloides o simplemente partículas dispersas de diferente tamaño y peso.

Agua potable ¹¹: Se conoce con este nombre al agua que ha sido tratada con el objetivo de hacerla apta para el consumo humano, teniendo en cuenta todos sus usos domésticos.

pH: El pH influye en algunos fenómenos que ocurren en el agua, como la corrosión y las incrustaciones en las redes de distribución. Aunque podría decirse que no tiene efectos directos sobre la salud, sí puede influir en los procesos de tratamiento del agua, como la coagulación y la desinfección.

Por lo general, las aguas naturales (no contaminadas) exhiben un pH en el rango de 5 a 9.

a) Aguas subterráneas¹¹

La mayor parte del agua subterránea se origina del agua de lluvia infiltrada hasta los acuíferos después de fluir a través del subsuelo. Durante la infiltración, el agua puede cargar muchas impurezas; tales como, partículas orgánicas e inorgánicas, residuos de plantas y animales, microorganismos, pesticidas, fertilizantes, etc. Sin embargo, durante su recorrido por el subsuelo mejora significativamente su calidad: las partículas suspendidas y microorganismos se retienen por filtración natural y las sustancias orgánicas se degradan por oxidación. Por otro lado, las sales disueltas, causantes de problemas como dureza y salinidad, no se remueven e incluso, se pueden incrementar considerablemente por la disolución de minerales del subsuelo. Otras sustancias o elementos frecuentemente presentes en las aguas subterráneas son: sulfatos, nitratos, hierro y manganeso, arsénico y flúor.

11. Manual 1 de la Cepis, El agua – Calidad y Tratamiento para consumo humano. Ing. Pérez Carrión, José. Página. 43-44 Jun 1992.

En muchos casos el agua es de buena calidad y puede usarse y beber directamente sin tratamiento, aunque siempre es preferible la desinfección como barrera de seguridad para prevenir contaminación durante el manejo del agua. Las aguas de pozos pueden contener contaminación microbiológica proveniente de letrinas cercanas, tanques sépticos, pastoreo de ganado o contaminación de sustancias orgánicas sintéticas de productos agroquímicos.

b) Aguas superficiales¹¹

Las fuentes de agua superficiales son los ríos, arroyos, lagos y presas. Su origen puede ser el agua subterránea que aflora a la superficie a través de manantiales o el agua de lluvia que fluye sobre la superficie del terreno hacia los cuerpos receptores. Si el agua superficial tiene su origen en el subsuelo, ésta contendrá sólidos disueltos; el agua que escurre por la superficie contribuye a la contaminación de los ríos o lagos principalmente con turbiedad y materia orgánica (como sustancias húmicas que dan color al agua), así como con microorganismos patógenos.

Los ríos y arroyos se caracterizan por tener rápidos cambios de calidad. Durante la época de lluvias se presentan incrementos en la turbiedad y otras sustancias orgánicas e inorgánicas debido al lavado y arrastre de los suelos. En lagos y embalses, el cambio estacional en la calidad del agua es gradual y menos drástico que en los ríos. En los meses de verano el agua se estratifica creando condiciones anóxicas y reductoras en el fondo del embalse que ocasiona la solubilización del hierro y el manganeso, en caso de estar presentes en los sedimentos, creando problemas de color y sabor. Las capas superiores son susceptibles de presentar un alto crecimiento de algas cuando las condiciones de nutrientes y temperatura son favorables (eutroficación).

Hasta el momento no se conocen efectos nocivos para la salud de estos elementos, sin embargo, las concentraciones elevadas de manganeso pueden acelerar el crecimiento biológico en los sistemas de distribución y contribuir a los problemas de sabor y olor en el agua, así mismo aumentan la demanda de cloro u otros oxidantes aplicados en la desinfección.

Rocas Ígneas¹⁴

Ígneos significa hechos del fuego o del calor. Cuando los volcanes entran en erupción y la roca líquida viene hasta la superficie de la tierra, se crea la nueva roca ígnea. Cuando la roca es líquida dentro de la tierra, se llama magma. Cuando el magma se endurece dentro de la corteza, se convierte en el granito. La mayoría de las montañas están formadas de granito. Se enfrían muy lentamente y es muy duro.

Minerales y elementos químicos:

Las rocas ígneas están compuestas fundamentalmente por silicatos, los cuales están constituidos mayoritariamente por silicio (Si) y oxígeno (O). Estos dos elementos, junto con el aluminio (Al), calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg) y hierro (Fe), constituyen más del 98% en peso de la mayoría de los magmas que al solidificarse forman las rocas ígneas. Además los magmas contienen pequeñas cantidades de muchos otros elementos como azufre (S), oro (Au), plata (Ag) uranio (U), tierras raras, gases en disolución, etc.

La arcilla está constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratado, procedente de la descomposición de minerales de aluminio. Presenta diversas coloraciones según las impurezas que contiene, siendo blanca cuando es pura. Surge de la descomposición de rocas que contienen feldespato, originada en un proceso natural que dura decenas de miles de años.

Físicamente se considera un coloide, de partículas extremadamente pequeñas y superficie lisa. El diámetro de las partículas de la arcilla es inferior a 0,002 mm. En la fracción textura arcilla puede haber partículas no minerales, los fitolitos. Químicamente es un silicato hidratado de alúmina, cuya fórmula es: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Piedra Pómez: El origen volcánico le dio ciertas características a la piedra pómez: una multitud de poros y células cerradas dan por resultado una porosidad con una solidez de grano al mismo tiempo. Si porosidad le permite absorber y retener el agua, además de hacerla ligera y otorgarle condiciones particulares, especialmente para el filtrado de productos de elaboración

industrial. La piedra pómez es tan suave que puede ser tallada, torneada y grabada con gran facilidad. Su color blanco le da una gran vistosidad, siendo también útil para la decoración. Debido a su ligereza puede flotar sobre las aguas a causa del aire contenido en sus cavidades. Aparte de eso la piedra pómez es resistente al frío, al fuego y a la intemperie y libre de sales solubles en agua. Las partículas de esta roca volcánica, poseen variadas formas predominando las alargadas y las angulosas. Sus poros cerrados le confieren una baja densidad, por lo que el comportamiento al impacto es muy ligero. Aunque es de dureza media, debido a su alta friabilidad el poder abrasivo es muy bajo, produciendo un efecto muy suave sobre la superficie trabajada.

Compuesto de trióxido de sílice y trióxido de aluminio, entre otros componentes:

71% de SiO₂, 12.8% de Al₂O₃, 1.75% de Fe₂O₃, 1.36% de CaO, 3.23% de Na₂O, 3.83% de K₂O, 3.88% de H₂O.

Se caracteriza por adquirir plasticidad al ser mezclada con agua, y también sonoridad y dureza al calentarla por encima de 800 °C. La arcilla endurecida mediante la acción del fuego fue la primera cerámica elaborada por el hombre, y aún es uno de los materiales más baratos y de uso más amplio. Ladrillos, utensilios de cocina, objetos de arte e incluso instrumentos musicales como la ocarina son elaborados con arcilla. También se la utiliza en muchos procesos industriales, tales como la elaboración de papel, producción de cemento y procesos químicos.

14. http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/casado/GEORED/Endogenas/igneas.htm

Granulometría¹⁶

Dentro de la clasificación granulométrica de las partículas del suelo, las rocas utilizadas ocupan el siguiente lugar:

TABLA I. GRANULOMETRÍA	
Partícula	Tamaño
Arcillas	< 0,002 mm
Piedra pómez	0,002-0,06 Mm
Arenas	0,06-2 Mm
Gravas,	2 Mm-6 cm
Cantos rodados – rocas ígneas, Volcánicas	6-25 cm
Bloques	>25 cm

16. Recopilado de Internet en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/011938/011938-03.pdf>

Remoción de hierro y manganeso⁶

La remoción del hierro de las aguas crudas superficiales es relativamente fácil removerla con los procesos comunes de remoción de la turbiedad, mediante los cuales su concentración puede bajar de 10 mg/L a 0,3 mg/L, que es la concentración recomendada para el agua de consumo. Sin embargo, es posible que haya problemas si el hierro está presente en complejos orgánicos inestables. Por lo general, en el agua es más difícil de controlar el manganeso que el hierro.

Su remoción se realiza formando sales insolubles, para lo cual, en muchos casos, es necesario el uso de oxidantes y un pH alto. Es necesario elevar el pH de 8,5 a 10,0, pero la precipitación es mejor cuando la aeración está acompañada por un contacto de dióxido de manganeso o un lecho de mineral de pirolusita.

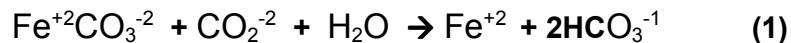
Cuando se remueve el hierro y el manganeso, estos se pueden acumular en los sistemas de distribución, transmitir sabor y olor al agua, darle color, interferir en la determinación del residual de cloro y provocar manchas en la ropa y en los sanitarios.

El Fe⁺² y el Mn⁺² son formas solubles invisibles existentes en medios reductores, es decir carentes de OD y con un pH bajo, como pueden serlo las aguas subterráneas y el hipolimnio anaerobio de lagos estratificados y en algunos casos aguas provenientes de algunos ríos y embalses.

El Fe existe en suelos y minerales principalmente como Fe⁺²O₃ insoluble, Fe⁺²S₂ (Pirita) y Fe⁺²CO₃⁻² (Siderita) que es muy poco soluble.

6. Sawey Clair N. / McCarty, Perry L. Chemistry for sanitary Engineers. McGraw Hill Book Company. Second Edition. Kogakusha company. LTd Tokio 1967.

Las aguas subterráneas contienen cantidades apreciables de CO₂ producidas por la oxidación bacteriana de la materia orgánica con la cual el agua entra en contacto y se puede disolver Fe⁺²CO₃⁻² a través de la reacción química:



Los problemas del Fe predominan cuando éste está presente en el suelo como compuestos Fe⁺³ insolubles que bajo condiciones reductoras anaerobias el Fe⁺³ es reducido a Fe⁺² sin dificultad.

Si existe OD en el agua la solución del Fe del suelo al agua no se lleva a cabo, aún en presencia de CO₂.

El Mn existe en el suelo como MnO₂, el cual es muy insoluble en aguas que contienen CO₂. Bajo condiciones anaeróbicas, el Mn en la forma de Bióxido es reducido de una valencia de +4 a una de +2, tal como sucede con el Fe.

Los hechos que indican que el Fe y Mn entran en solución en el agua, mediante cambios producidos por las condiciones ambientales por acción biológica son:

- Las aguas subterráneas que contienen cantidades apreciables de Fe y Mn carecen siempre de OD y poseen un alto contenido de CO₂. El alto contenido de CO₂ indica que ha existido oxidación bacteriana de la materia orgánica.
- Los pozos que producen agua de buena calidad, con bajo contenido de Fe y Mn, deterioran su calidad cuando se han descargado residuos orgánicos sobre el suelo, alrededor del pozo y se generan condiciones anaerobias.
- En embalses y lagos, el problema del Fe y Mn ocurre cuando se desarrollan condiciones anaerobias en el hipolimnio. Al presentarse el volcamiento (volteo) o mezcla de las aguas superficiales y profundas, el Fe y Mn se distribuye en todo el embalse y el lago, por lo que hay que esperar un tiempo adecuado para la oxidación y sedimentación del Fe y Mn en condiciones naturales.

6. Sawey Clair N. / McCarty, Perry L. Chemistry for sanitary Engineers. McGraw Hill Book Company. Second Edition. Kogakusha company. LTd Tokio 1967.

El Mn^{+4} y Fe^{+3} son las únicas formas estables del Mn y Fe en aguas que contienen oxígeno y en condiciones reductoras anaerobias el Mn^{+2} y Fe^{+2} .

El Fe y Mn insolubles son reducidos a sus formas solubles en condiciones anaerobias, lo cual es esencial para que se disuelvan en el agua.

OTROS MÉTODOS DE REMOCIÓN: ⁶

1. Aeración u oxidación química - filtración por arena o arena y antracita.

Para una concentración mayor de 5 mg/L es necesario un tanque de contacto de 20 a 30 min. de retención, y en el caso de concentraciones mayores de 10 mg/L de Fe el tren se completa con unidades de floculación y sedimentación donde además de coagulante (alternativo), se requiere $Ca(OH)$ o $NaOH$ para el ajuste de pH, en su caso. En la práctica, los agentes oxidantes se introducen en un punto cercano a la fuente, con el fin de asegurar mayor tiempo de contacto.

2. Tratamiento convencional combinado con ablandamiento.

Aplicable sólo para agua con alta dureza, donde la remoción de Fe y Mn es un efecto secundario. En el proceso de ablandamiento del agua se logra remover parte de Fe y el Mn por la con precipitación con la cal, acelerando la oxidación del Fe y el Mn por el aumento del pH.

3. Estabilización por secuestro.

Limitado a concentraciones de Fe hasta 0.5 mg/L, puesto que la técnica no lo remueve, sólo evita el efecto de su precipitación y la coloración del agua.

4. Intercambio iónico operando a ciclo de Na.

Con lo que se logra la remoción total del $Fe(II)$ y $Mn(II)$ relacionado con un aumento de la concentración de sodio y a la interrupción frecuente del proceso para la regeneración de la resina. Como resina de intercambio se utilizan zeolitas sintéticas, pero su uso en la práctica ha sido limitado por la

selectividad al Ca y otros iones de mayor valencia, presentes comúnmente en agua, y con los que el hierro y el manganeso tienen que competir desfavorablemente. En esta técnica de remoción de Fe y Mn no aplicar oxidantes al efluente de la resina, puesto que los precipitados Fe(OH) o MnO saturan el medio.

5. Filtración por Greensand.

Recomendable para concentraciones de Fe < 1.0 mg/L de Fe o Mn. Como medio de contacto se utiliza el mineral denominado glauconita, que tiene capacidad de intercambiar electrones y así oxida el Fe y Mn hasta sus formas insolubles, así la capacidad de remoción se integra por los procesos de oxidación de fierro y manganeso y filtración de los compuestos formados. El medio tiene una capacidad de 1.5 kg de Fe o Mn/m³, requiriendo para su regeneración 2.9 kg KMnO₄/m³.

6. Control de hierro y manganeso *in situ*.

La técnica es conocida como redox y se aplica sólo para controlar la concentración en el agua alrededor de la fuente, promoviendo el desarrollo de bacterias que precipitan el Fe y el Mn en el acuífero y previenen su migración hacia el pozo. La complejidad y el costo no permiten su amplio uso en la práctica.

6. Sawey Clair N. / McCarty, Perry L. Chemistry for sanitary Engineers. McGraw Hill Book Company. Second Edition. Kogakusha company. LTd Tokio 1967.

Los filtros convencionales de arena no garantizan la remoción requerida del hierro y manganeso, cuyos óxidos/hidróxidos atraviesan el filtro y rápidamente llegan a su propio "punto de quiebre" en el efluente. Por lo general, la remoción de manganeso es mucho más complicada que la del hierro, incluso cuando correspondientes a los se garantiza su oxidación completa. Los óxidos ($MnO_x(s)$) diversos estados de oxidación del $Mn(II)$, son aún más difíciles de capturar en el filtro sin agregar coagulantes y/o floculantes antes del proceso.

Métodos de aeración ¹⁵

La aireación se efectúa mediante caídas de agua en escaleras, cascadas, chorros y también aplicando el gas a la masa de agua mediante aspersion o burbujeo.

Se usa en la remoción de hierro y manganeso, así como también de anhídrido carbónico, ácido sulfhídrico y sustancias volátiles, para controlar la corrosión y olores. En la aeración, el hierro se puede oxidar, pero en la remoción del manganeso, la aeración sola no es suficiente.

Entre los procesos o métodos de remoción de hierro y manganeso tenemos:

1. Aireación
2. Aireación y cloración
3. Oxidación con $KMnO_4$
4. Proceso con zeolita de manganeso y $KMnO_4$

1 Aireación-filtración

El proceso de aireación-filtración se recomienda para agua con alta concentración de hierro (mayor de 5 mg/L) con el fin de disminuir los costos en reactivos. El equipo usado en este proceso incluye comúnmente un aireador, un tanque de retención y filtros. El oxígeno de la atmósfera reacciona con las formas solubles de hierro y manganeso (Fe^{+2} y Mn^{+2}) del agua cruda para producir óxidos relativamente insolubles (Fe^{+3} y Mn^{+4}) de estos elementos. La

velocidad de reacción depende del pH de la solución, siendo más rápida a valores de pH altos. Ya que el manganeso tiene una velocidad de oxidación muy lenta vía el O_2 (ac) esta técnica no es muy efectiva para la remoción de Mn^{+2} , excepto a valores de pH mayores de 9,5. Para disminuir las concentraciones de manganeso al nivel deseado se requieren frecuentemente un tiempo de reacción y un tratamiento químico adicionales.

Dependiendo de las características del agua cruda puede ser necesario un tiempo de reacción hasta de algunas horas después de la aireación. Si las concentraciones de hierro y manganeso total son altas, algunas veces se usan tanques de sedimentación con dispositivos de colección y remoción de lodos en vez de tanques de retención simples. Las principales desventajas del proceso de aireación-filtración son el costo inicial alto, y el requerimiento de un tiempo de retención y tratamiento químico adicionales si la concentración de Mn soluble del agua a tratar es mayor a 1 mg/L.

Oxígeno

En contacto con el oxígeno disuelto en el agua, las sales ferrosas se convierten en férricas por oxidación y se precipitan en forma de hidróxido férrico. Esta precipitación es inmediata con un pH superior a 7,5. Con un pH mayor de 2,2, el hidróxido férrico es insoluble. El ión ferroso lo es con un pH mayor de 6. De acuerdo con ello, las aguas subterráneas, que por estar fuera del contacto con el aire, se encuentran en un medio natural fuertemente reductor— podrán tener en solución cantidades notables de hierro ferroso.

Aireadores de cascada: El principio general consiste en esparcir el agua al máximo y dejarla correr sobre obstáculos para producir turbulencia. La estructura más simple es la de escaleras, las cuales esparcen el agua y permiten la caída de un nivel a otro.

Sawey Clair N. / McCarty, Perry L. Chemistry for sanitary Engineers. McGraw Hill Book Company. Second Edition. Kogakusha company. LTd Tokio 1967.

REMOCIÓN DEL Fe y Mn POR AIREACIÓN

La oxidación del Fe y Mn por aireación se representa así:

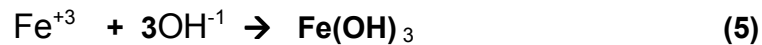
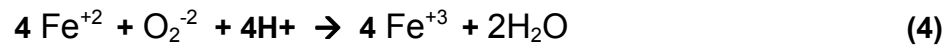


Fe soluble Fe insoluble



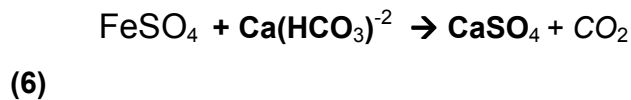
Mn soluble Mn insoluble

También se puede representar así:

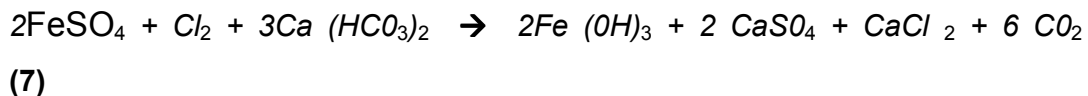


Este proceso es lento, si Fe es alto y el pH > 7.5 U la reacción se ve limitada por la baja transferencia de oxígeno a la solución, aunque la remoción se ve favorecida, ya que para un pH entre 5 y 11 U el Fe(OH)₃ es insoluble. El Mn no se remueve.

Reacciones del sulfato ferroso 15:



En aguas aireadas, el hidróxido ferroso se oxida a hidróxido férrico.



2 Oxidación-Filtración

El proceso de oxidación-filtración consiste normalmente de un sistema de dosificación de productos químicos y filtros. Algunas veces se requiere un tanque de retención y un sistema de ajuste de pH con hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de calcio o cal hidratada Ca(OH)₂ o carbonato de sodio (Na₂CO₃). Este proceso opera a pH mayor o igual a 8.4; pero se tienen

deficiencias en el proceso de filtración por la formación de precipitados coloidales que pasan a través del filtro. Como agentes oxidantes pueden usarse:

Cloro

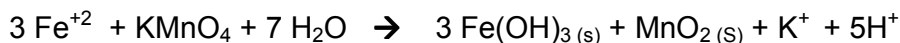
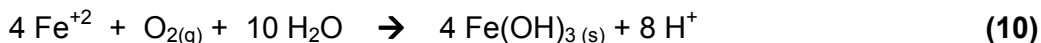
El cloro, oxidante poderoso, es, sin duda alguna, el desinfectante más importante que existe, debido a que reúne todas las ventajas requeridas, incluyendo su fácil dosificación y costo conveniente.

La coagulación convencional mediante el sulfato de aluminio, especialmente cuando se practica la precloración, remueve el fierro y el manganeso.

Oxidación de los iones solubles de Fe^{+2} y Mn^{+2} , por aireación.



Oxidación de los iones solubles de Fe^{+2} y Mn^{+2} , por permanganato de potasio



(11)



(12)

Oxidación de los iones solubles de Fe^{+2} y Mn^{+2} , con cloro

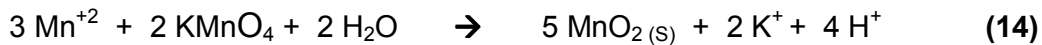
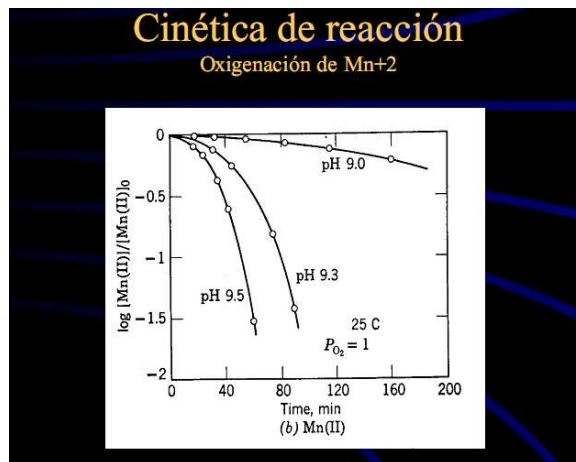
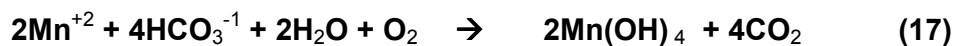
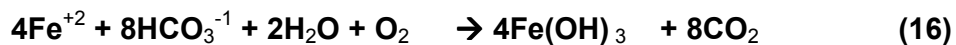


Figura 2. Cinética de la reacción



IMPORTANCIA SANITARIA DEL Fe y Mn ⁴

La tasa de oxidación del Fe y Mn es lenta y por ellos la forma soluble persiste por algún tiempo en aguas aireadas, esto es válido para el Fe cuando el pH < 6 U y en el Mn el pH < 9 U. Al ponerse en contacto el agua subterránea con el aire da las siguientes reacciones:



Si no hay un tratamiento adecuado para remover el Fe y Mn, éstos interfieren en las operaciones de lavado e imparten tinciones indeseables en la ropa, en los artefactos sanitarios, en los accesorios de plomería, producen incrustaciones en las tuberías y dificultades en los sistemas de distribución.

El Fe soluble promueve el crecimiento de bacterias autotróficas en los sistemas de distribución, las cuales oxidan el Fe de ferroso a férrico, formando lamas de

color rojizo y el Mn de color gris a azul oscuro o negro dependiendo de la concentración.

Cuando las bacterias mueren y se descomponen, impregnan de malos olores y sabores al agua. El Fe y Mn inclusive en bajas concentraciones, imparten sabores metálicos a la misma.

Cuando el contenido de Fe en el agua es alto, el ácido tánico del té y del café se pueden combinar con el Fe y ennegrecen la bebida, por lo que el café se hace desagradable al paladar si el contenido de Fe es mayor de 1 mgL.

El hierro y el manganeso afectan no solamente la calidad de agua, sino provocan también una serie de problemas de operación y mantenimiento en todo el sistema de abastecimiento por formar depósitos en la red de distribución y/o corrosión de las partes metálicas integrantes del sistema de abastecimiento.

TABLA II

Característica	Norma Guatemalteca Obligatoria NGO ¹⁰ 29005:99	
	Límite mínimo aceptable miligramos /L	Límite máximo permisible miligramos/ Litro
HIERRO	0.1	1
MANGANESO	0.05	0.5

Fuente: Norma Guatemalteca obligatoria

10.Norma Guatemalteca, obligatoria. Agua para consumo humano.

6. METODOLOGÍA

Diseño de la investigación: Se utilizará un diseño experimental en la que las condiciones y variables se establecen en una situación y condiciones definidas para la remoción de hierro y manganeso.

Plan de la investigación: El plan incluirá actividades que tienden a encontrar la respuesta a la hipótesis de investigación, entre ellas:

- Pruebas fisicoquímicas, que responden al análisis de remoción del Hierro y Manganeso por oxidación en contacto con diversos medios filtrantes.
- El muestreo se tomará en tiempos definidos de dos o tres horas, tiempos que se incrementarán o reducirán, de acuerdo a los resultados de remoción de hierro y manganeso que se vayan obteniendo en el agua aireada con las diferentes medios de contacto que se utilizarán, incluyendo una corrida en contacto solo con el aire.

Estrategia: Comprende los muestreos necesarios, para evaluar tiempos de aireación para la remoción de hierro y manganeso con los medios de contacto, piedra volcánica, piedra pómez, arcilla y solo con aire. Se utilizará la técnica medición de contenido de hierro y manganeso por medio de espectrofotometría.

Muestreo: Los diversos sistemas de aireación tuvieron la misma posibilidad de ser muestreados, sin embargo se redujo el tiempo de muestreo en el proceso de aireación del agua con concentración de hierro y manganeso en contacto con piedra volcánica, luego de determinar la reducción del 100% del manganeso a las 3 hrs. de aireación.

Instrumentos de medición: Reactivos químicos para determinación de fe y manganeso, a través de espectrofotometría.

VARIABLES A MEDIR: Contenido de Hierro, Contenido de Manganeso, Tiempos de aireación, todas las variables anteriores, sometidas a 4 medios de contacto diferente. (piedra pómez, arcilla, y piedra volcánica y sin ningún medio de contacto.

DETERMINACIÓN DE MANGANESO HR. (0 A 20.0 mg/l) Alto Rango

INSTRUMENTOS

- 1 Aparato
- 2 Células de vidrio
- 1 Bolsita de tampón tipo citrato
- 1 Bolsita de periodato sódico

Procedimiento

1. Introducir el numero del programa almacenado para manganeso (mn) reactivo en polvo, presionar 295 read enter.
2. El display mostrara poner nm a 525
3. Girar la perilla a un lado del aparato hasta que la pantalla muestre 525 nm
4. Presionar read enter, la pantalla mostrara mg/l mn h
5. Llenar una célula con 25 ml de la muestra de agua a analizar
6. Añadir el contenido de una bolsita de tampón tipo citrato, agitar para mezclar
7. Añadir una bolsita de periodato sodico a la célula de la muestra (muestra preparada), agitar y mezclar. reposar durante 2 min., en presencia de manganeso aparecerá un color violeta.

8. Llenar otra célula con 25 ml de la muestra (blanco)
9. Colocarla en el porta células y cerrar la tapa (blanco)
10. Presionar zero, esperar hasta que la pantalla marque 0.0 mg/l mn h
11. Antes de 8 minutos del periodo de reacción de la muestra preparada, colocar la célula en el aparato y cerrar la tapa.
12. Presionar read enter, esperar y la pantalla mostrara el resultado en mg/l mn

FE HIERRO TOTAL USANDO AMPOLLAS DE ACCUVAC

1. Introduzca el número de programa para hierro (Fe), ampollas AccuVac. Pulse 265 READ/ENTER El display indicará poner nm a 510.

Nota: O use la flecha hacia arriba y abajo para poner el display en 265 mg/Fe fV AV y pulse: READ/ENTER. Si las muestras no pueden ser analizadas inmediatamente, deje muestreo y almacenaje, más abajo . Ajuste el pH de las muestras almacenadas antes de analizar.

2. Gire el dial de la longitud de onda hasta que el pequeño display indique 510 nm Nota. La determinación del hierro total necesita una digestión previa use digestión suave, fuerte o digesdahl (sección I).
3. Pulse READ/Enter El display indicara mg/L Fe FV AV
4. Llene un vial de cero (el blanco) con 10 ml de muestra por lo menos. Recoja al menos 40 ml de muestra en un vaso de 50 ml. Nota: para realizar una prueba de la exactitud use una solución estándar de hierro de 1.0 mg/L (preparación dada en la prueba de exactitud) en lugar de la muestra.

5. El método más común y utilizado en el estudio fue para muestras de 25ml:
6. En una celda se colocaron 25 ml de la muestra. Al contenido de la celda se le añadió una bolsita de polvo Hierro FerroVer y se movió a modo de disolver el reactivo.
7. Se colocó otros 25 ml en otra celda, como blanco. Después de 3 minutos se realizó la prueba colocando en el espectrómetro la celda de blanco para la comparación; presionando cero, y luego se evidenció la lectura de la muestra.

Importancia

Pequeñas cantidades de hierro por lo regular se encuentran en el agua debido a la gran cantidad de hierro presente en la tierra y porque el agua corrosiva recoge hierro de las tuberías. La ropa lavada en agua que contiene exceso de hierro se puede manchar un color marrón. El sabor de bebidas, tales como el café y el té también pueden ser afectadas por el hierro. El manganeso produce un color marrón en ropa lavada, dejando partículas negras en accesorios de plomería como con hierro, afecta el sabor de bebidas, incluyendo el café y té.

PROCEDIMIENTOS

El principio general consiste en esparcir el agua al máximo y dejarla correr sobre obstáculos para producir turbulencia. La estructura más simple es la de escaleras, las cuales esparcen el agua y permiten la caída de un nivel a otro.

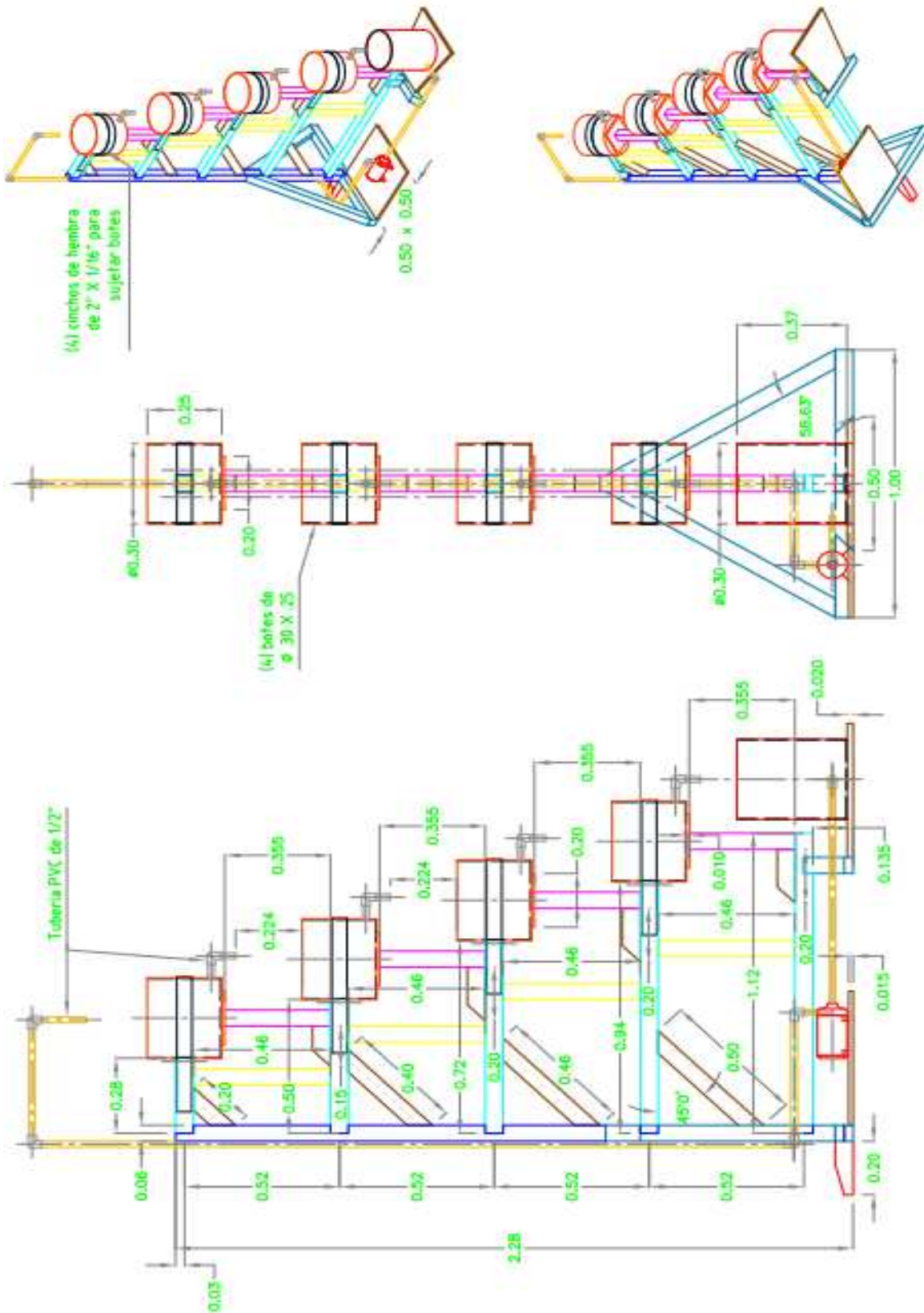
Elaboración del sistema de aeración tipo cascada.

1. Construir una estructura tipo escalera, un sistema tipo cascada, con cinco escalones con distancias y altura definida en el presente plano; en

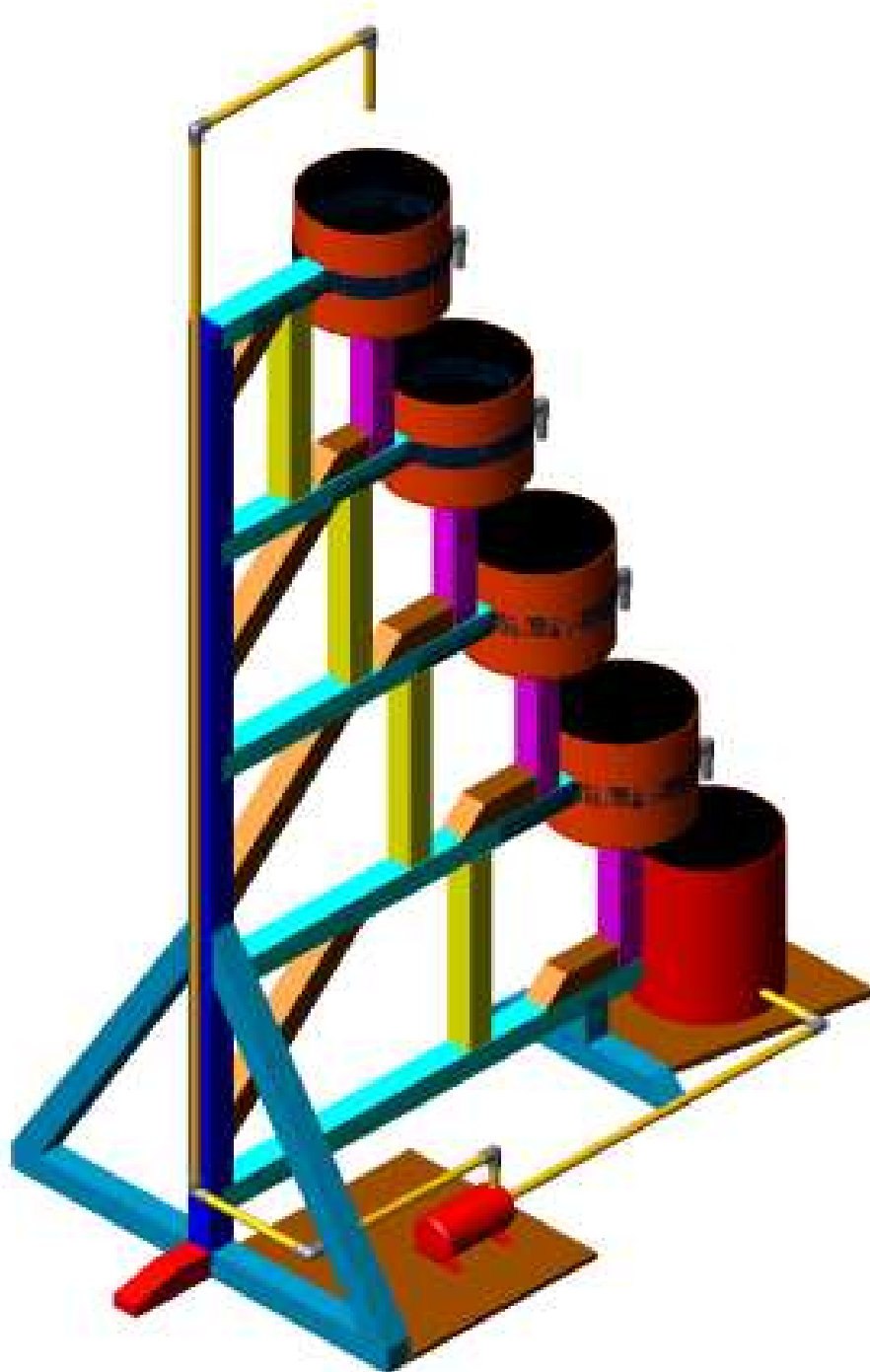
la cuales se dejarà caer agua a contenedores que contendrán medio de contacto para provocar mayor turbulencia y aireación.

2. Colocar al sistema tubería para alimentación del agua en la que se permita recircular y provocar mayor turbulencia para una mejor aireación, a partir de una bomba.
3. Colocar en cada contenedor un medio filtrante, como piedra volcánica, piedra pómez y arcilla.
4. Disponer de una bomba de succión, para airear el agua con Fe y Mn, sobre el medio filtrante.
5. Tomar lecturas de Fe y Mn, a diferentes tiempos de aireación: iniciar a cada 2 hrs. de aireación, incrementar o reducir según resultados en la remoción de hierro y manganeso, para definir coeficientes de oxidación.
6. Realizar lavado del sistema entre cada muestreo, teniendo cuidado de terminar el lavado recirculando agua con fe y Mn, para evitar falsos resultados.
7. Hacer comparaciones de resultados.
8. Repetir los pasos anteriores para hacer las pruebas en triplicado y concluir con base a resultados promediados.

Figura 3. Diseño de la cascada. (dimensiones en m)



**Figura 4. Sistema de aireación por gravedad tipo cascada.
Sistema de re-circulación mecánica**



PARÁMETROS DE DISEÑO DE LA CASCADA DE OXIGENACIÓN.

TABLA III

Velocidad inicial en la cascada se puede considerar cero.	Vo. = 0
Altura del escalón	0.355m
Altura de la cascada	2.635 m
Tiempo de caída th, en cada escalón de altura h, se calcula por la ecuación: $t_h = \sqrt{2h/g}$.	.h= 0.355m, g= 9.81m/s $T_h = \sqrt{2 \cdot 0.355m / 9.81 \text{ m/s}^2}$ Th= 0.27 segundos de caída en cada escalón de la cascada.
Aforo del escalón	Aforo a 0.27 seg = 0.118L → $0.118L / 0.27 \text{ seg} = 0.437L \cdot 1m^3 / 1000L \cdot A / 0.09m^2 =$ Vel del escalón 0.0048559 m/s
Caudal	$Q = V_o \cdot A = (0.0048559m/s \cdot (0.3m \cdot 0.3m)) =$ $0.000437m^3/s \cdot 1000L/m^3 =$ Q= 0.4370L/s
Tiempo de contacto con el aire tc= $n \sqrt{(2H/n)/g} = \sqrt{2Hn/g}$ n= numero de escalones individuales de la cascada, H= altura total de la caída	N= 5, H= 2.635m $\sqrt{2(2.635m)(5)/9.81m/s^2}$ Tc= 1.6389 segundos de tiempo que el agua tuvo contacto con el aire, en la caída completa de la cascada..
Velocidad inicial del flujo en la boquilla asumiendo que el agua sale a un ángulo de 90°. $Y = (V_o \cdot \text{Sen } \theta) t - gt^2/2$. $0 = (V_o \cdot \text{Sen } 90^\circ) (1.6389 \text{ s}) - (9.81m/s^2) (1.6389s)^2/2$	$V_o = \frac{((9.81m/s^2)(1.6386)^2)/2)}{(1.6389s) (\text{sen } 90^\circ)}$ Vo.= 8.03 m/s

<p>Caudal de la boquilla $Q = V_o A$</p>	<p>$Q = 8.03 \text{ m/s } (0.3 \times 0.3 \text{ m})^2 = 0.7227 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q = 722.7 \text{ L/s}$</p>
<p>Velocidad de Filtración (Vf)</p> <p>La velocidad de aproximación del flujo es un parámetro hidráulico muy importante. La velocidad de aproximación, conociendo el caudal exacto (Q), que ingresa a cada unidad, puede determinarse mediante la ecuación de continuidad, midiendo las dimensiones del área (AL) del lecho filtrante, en cada escalón de la cascada de aireación.</p>	<p>$V_f = Q / AL$</p> <p>$V_f = (0.000437 \text{ m}^3/\text{s} / (0.30 \text{ m} \times 0.30 \text{ m}))$</p> <p>$V_f = 0.00003933 \text{ m/s}$</p>
<p>Número de veces que el agua se expuso en contacto con los medios filtrantes utilizados</p> <p>Tiempo total requerido para dar una vuelta = T_c(tiempo en contacto con el aire +Tiempo en los contenedores) + (tiempo de subida en el sistema)</p> <p>Número de vueltas del agua con fe y manganeso en recirculación = Tiempo óptimo de remoción en segundos / tiempo total x vuelta (seg)</p>	<p>Tiempo en el contenedor = $\sqrt{(2h/g)}$ $= \sqrt{(2 \times 0.25 \text{ m} / 9.81 \text{ n/s})} = 0.2257 \text{ seg/contenedor}$ $\times 5 \text{ contenedores} = 1.1288 \text{ seg.}$</p> <p>Tiempo total x vuelta = $(1.6389 \text{ seg} + 1.1288) \times 2$</p> <p>Tiempo total x vuelta = 5.5354 segundos.</p> <p>Número de vueltas del agua en recirculación con piedra volcánica = $(90 \times 60) \text{ s} / 5.5354 = 975 \text{ vueltas}$</p> <p>Número de vuelta del agua en recirculación con Arcilla = $(720 \times 60) \text{ s} / 5.5354 \text{ seg} = 7,804 \text{ vueltas}$</p> <p>Número de vueltas del agua en recirculación con piedra pómez = $(666 \times 60) \text{ s} / 5.5354 \text{ seg} = 7,218 \text{ vueltas}$</p> <p>Número de vueltas del agua sin medio de contacto = $(420 \times 60) / 5.5354 \text{ seg} = 4,552.51 \text{ vueltas}$</p>
<p>Descripción de la bomba de recirculación del flujo:</p>	<p>373 vatts = ½ HP, Flujo max = 40 lts/min, altura más = 40 mts. Máxima profundidad de succión 8m.</p>

MÉTODOS EVALUADOS

Esta etapa de evaluación, se reduce básicamente a efectuar un muestreo del agua cruda subterránea del municipio de Mixco; que contiene apreciables cantidades de hierro y manganeso y carecen de oxígeno disuelto y tienen alto contenido de dióxido de carbono; en las que el hierro está presente como Fe^{+2} y Mn^{+2} . Esta agua fue aireada, para determinar concentración de los parámetros que caracterizan la eficiencia del proceso y de algunos parámetros de calidad del agua cruda; como lo fue la identificación de la presencia y concentración de hierro y manganeso; y el monitoreo de oxidación mediante la aireación en un sistema tipo cascada.

El propósito de este estudio conlleva a determinar la eficiencia y remoción del hierro y manganeso, utilizando el proceso de aireación de agua contaminada de forma natural con hierro y manganeso; en el sistema construido para la airearla en contacto con diferentes medios filtrantes.

Evaluación 1: Aireación en contacto con piedra volcánica

Evaluación 2: Aireación en contacto con arcilla

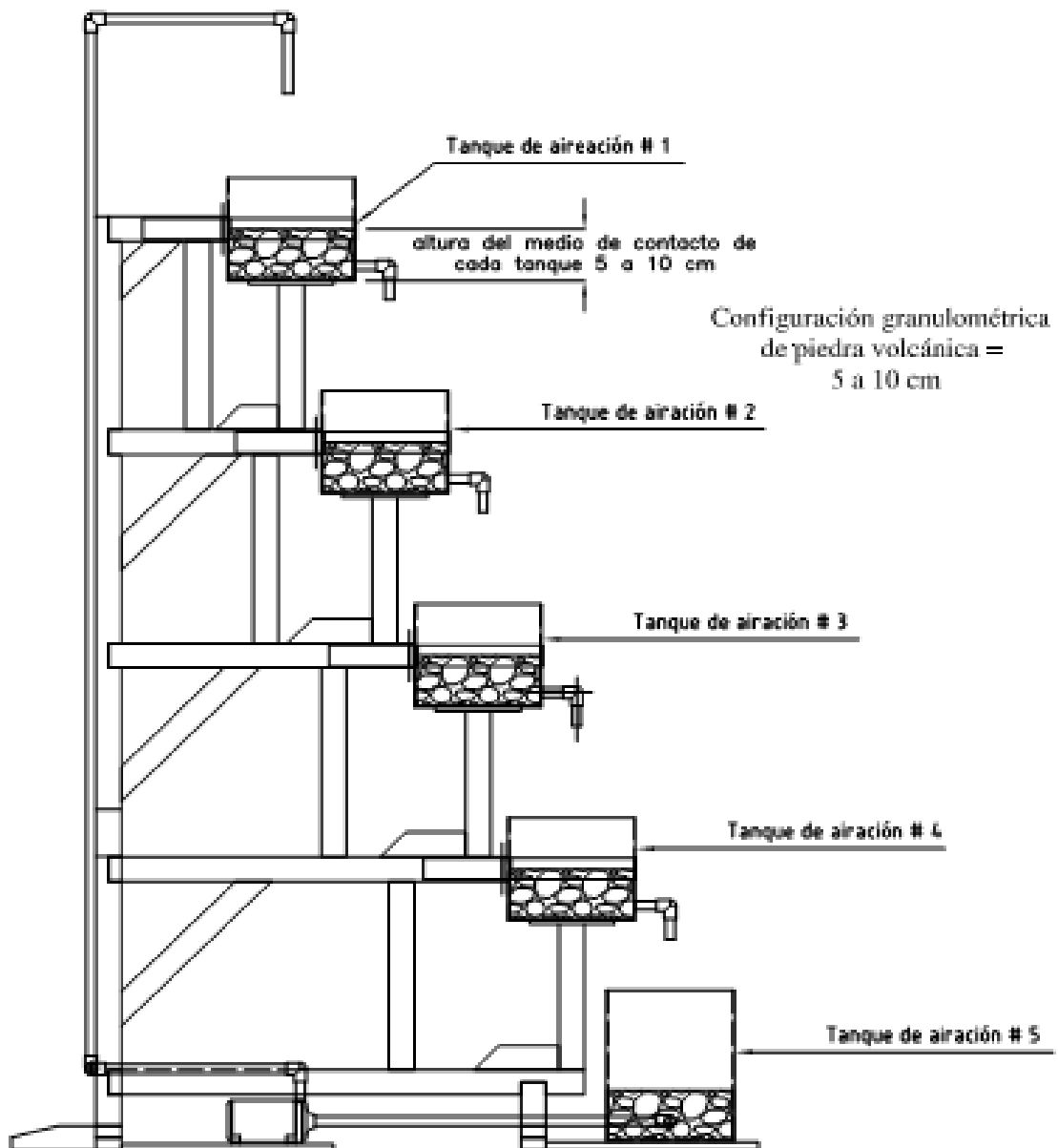
Evaluación 3: Aireación en contacto con piedra pómez

Evaluación 4: Aireación sin ningún medio de contacto; para obtener resultados de referencia y evaluar la influencia de los medios de contacto en el proceso de remoción por aireación.

Evaluación 1

Figura 5

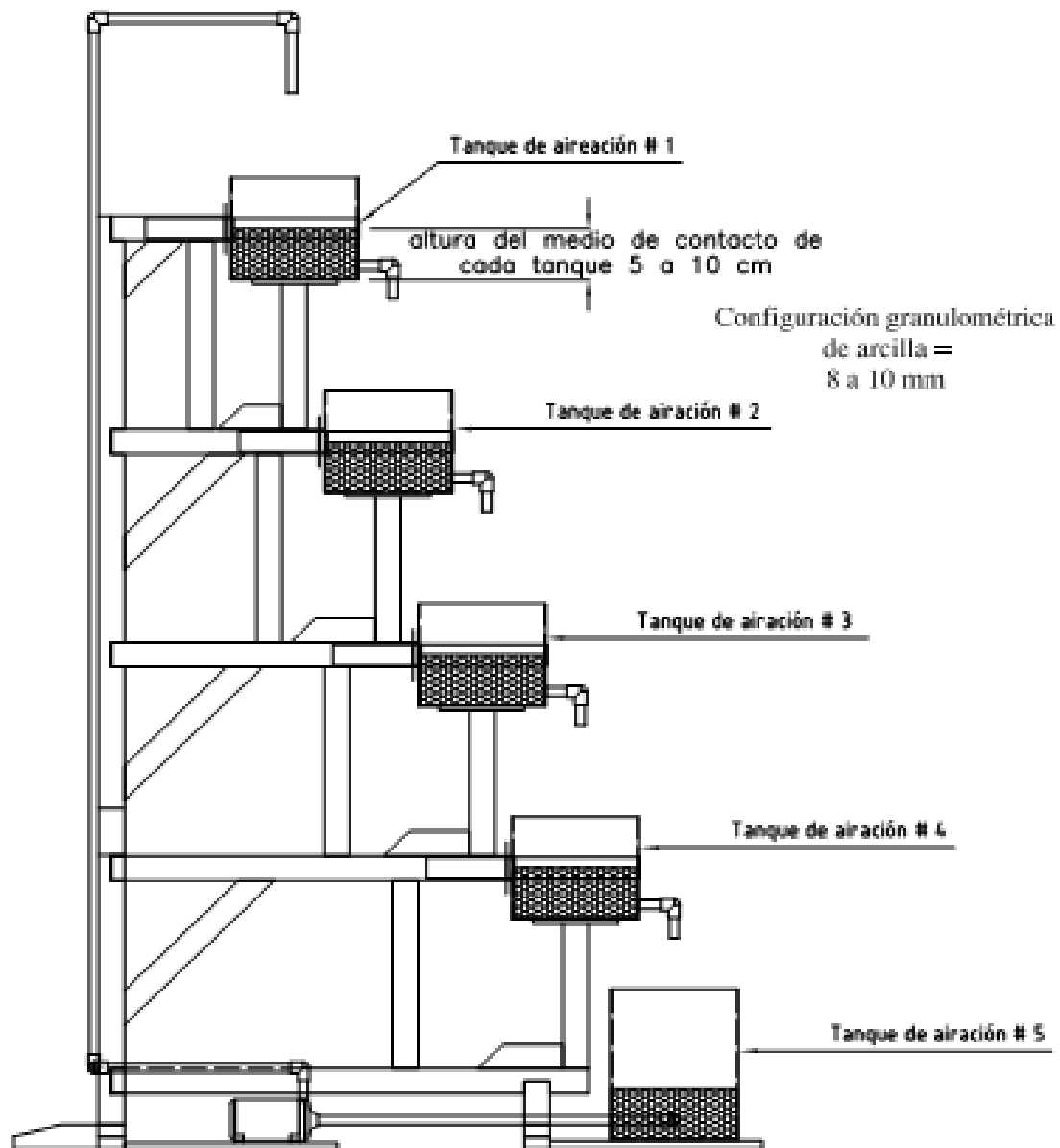
ESQUEMA PILOTO DEL SISTEMA DE AIREACIÓN TIPO CASCADA CON PIEDRA VOLCÁNICA COMO MEDIO DE CONTACTO; PARA REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO



EVALUACIÓN 2

Figura 6

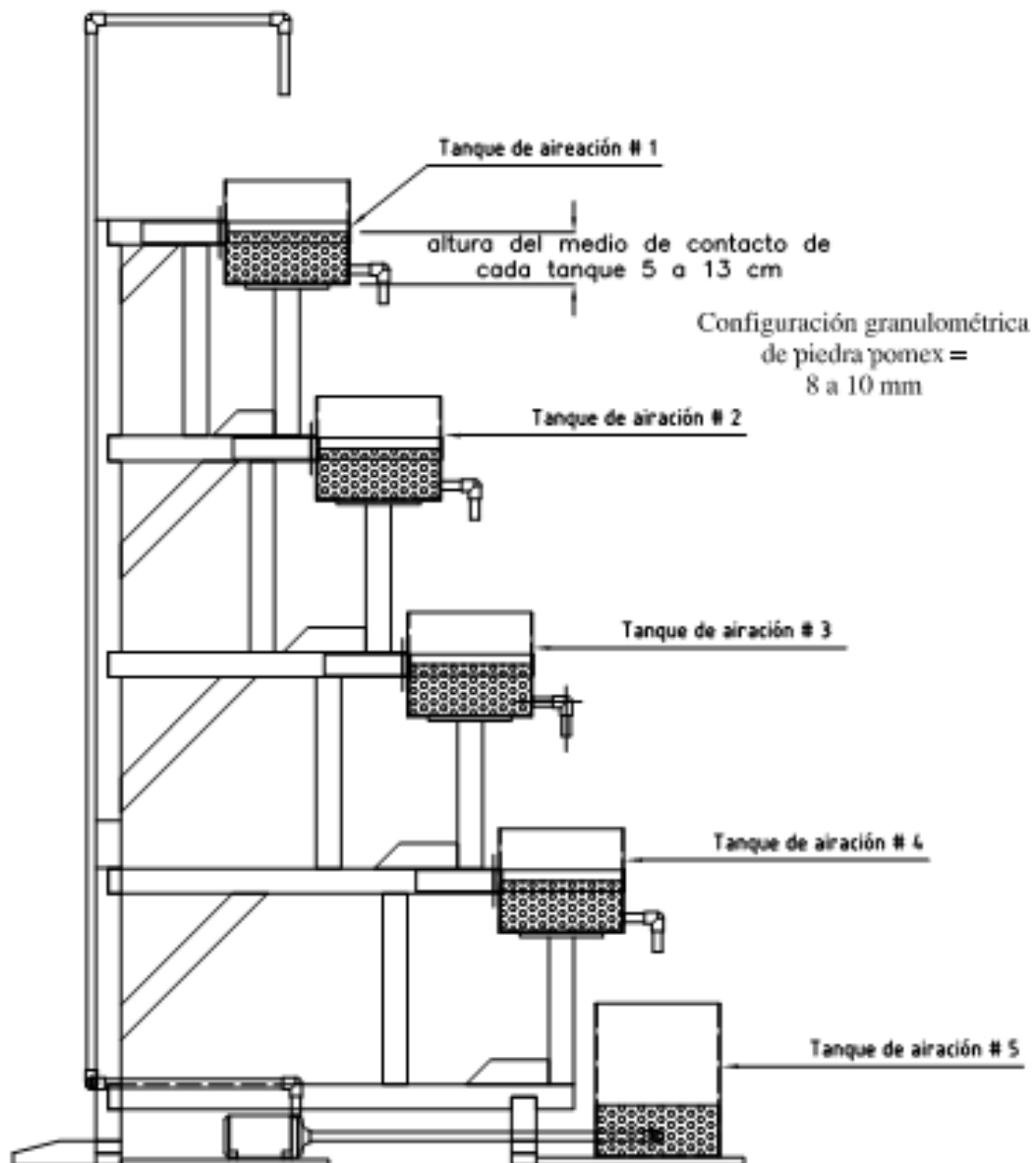
ESQUEMA PILOTO DEL SISTEMA DE AIREACIÓN TIPO CASCADA CON ARCILLA COMO MEDIO DE CONTACTO; PARA REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO



EVALUACIÓN 3

Figura 7

ESQUEMA PILOTO DEL SISTEMA DE AIREACIÓN TIPO CASCADA CON
PIEDRA POMEX COMO MEDIO DE CONTACTO; PARA REMOCIÓN DE
HIERRO Y MANGANESO



7. RESULTADOS

El objetivo general de este estudio fue evaluar los tiempos óptimos para adquirir la mejor eficiencia de remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2} evaluando tres procesos de aireación de agua contaminada de forma natural con Fe^{+2} y Mn^{+2} ; haciéndola pasar en contacto con piedra volcánica, piedra pómez, arcilla y sin ningún medio de contacto.

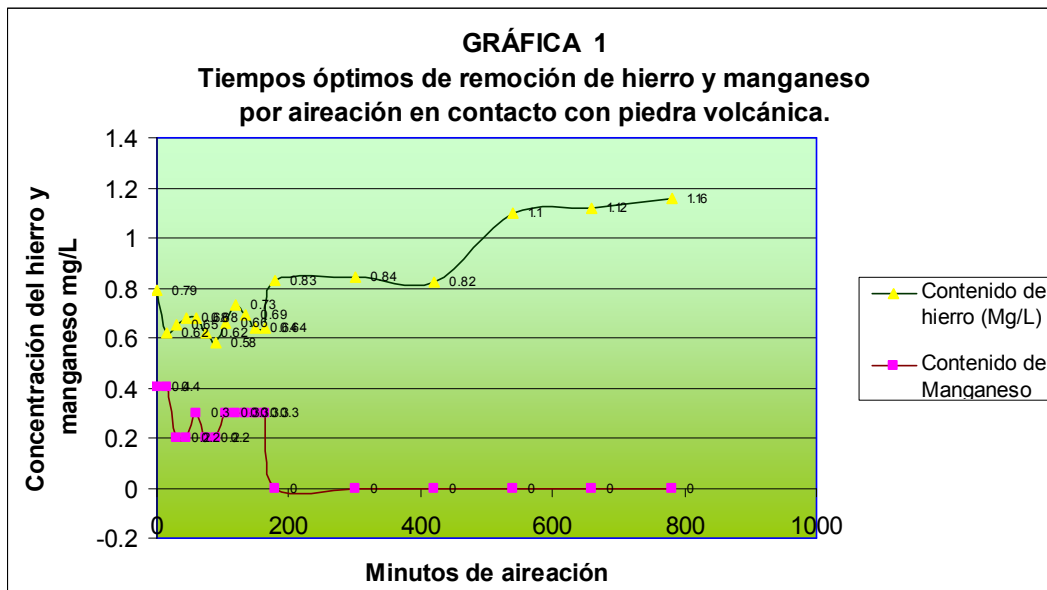
7.1. PRIMERA EVALUACIÓN

AIREACIÓN DE AGUA EN CONTACTO CON PIEDRA VOLCÁNICA

No. Muestra	TIEMPO (MIN)	Contenido de hierro (Mg/L)	Contenido de Manganese (Mg/L)	pH	°C	% eficiencia remoción de hierro	% eficiencia remoción de manganeso
0	0	0,79	0,4	7,239	25,8	0	0
1	15	0,62	0,4	7,494	25	21,52	0
2	30	0,65	0,2	7,691	25	17,72	50
3	45	0,68	0,2	7,447	25,2	13,92	50
4	60	0,68	0,3	7,771	25,3	13,92	25
5	75	0,62	0,2	7,38	25,4	21,52	50
6	90	0,58	0,2	7,293	25,4	26,58	50
7	105	0,66	0,3	7,34	25,3	16,46	25
8	120	0,73	0,3	7,877	25,5	7,59	25
9	135	0,69	0,3	7,48	25,6	12,66	25
10	150	0,64	0,3	7,166	25,5	18,99	25
11	165	0,64	0,3	7,222	25,5	18,99	25
12	180	0,83	0	8,224	25,6	-5,06	100
13	300	0,84	0	7,769	25,7	-6,33	100
14	420	0,82	0	7,7775	25,9	-3,80	100
15	540	1,1	0	7,786	25,6	-39,24	100
16	660	1,12	0	7,759	25,7	-41,77	100
17	780	1,16	0	7,759	25,9	-46,84	100
3,870 Minutos aireados							
64.50 horas aireadas							
2.69 Días aireados							

Fuente: Resultados de remoción por transferencias de gases por aireación y por intercambio iónico por adsorción en contacto con piedra del Volcán de Pacaya.

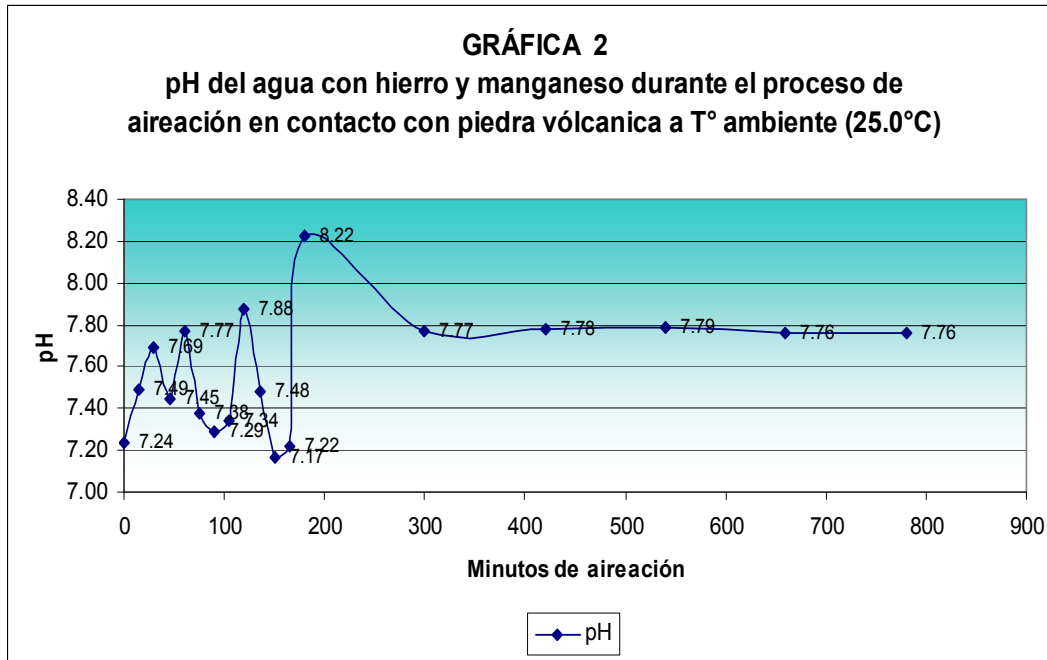
Este estudio tiene como ventaja que se logró remociones mayores al 70 y 90% de Fe^{+2} y Mn^{+2} respectivamente; demostrando que con el sistema propuesto se puede remover estos metales en forma conjunta sin necesidad de controles sofisticados en la operación. Sin embargo, los rendimientos en la productividad del agua aireada con la piedra volcánica, no son favorables, ya que durante la aireación se pierden un gran porcentaje de agua, por evaporación ambiental debido a que se requiere de mucho tiempo de aireación, y por absorción del agua por el medio filtrante, así también hay reducción del volumen de agua por perdidas durante el proceso (salpicado).



Fuente: Resultados de remoción por transferencias de gases por aireación y por intercambio iónico por adsorción en contacto con piedra del Volcán de Pacaya.

El sistema diseñado para medir tiempos óptimos de aireación y remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2} , operó por un tiempo aproximado desde 15 min, hasta 3,870 minutos en total para la aireación en la primera evaluación utilizando solo piedra volcánica como medio de contacto, determinándose un tiempo óptimo de operación de 90 minutos de aireación para la remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2} ;

Las condiciones de pH también influyeron a que el proceso de remoción fuera muy lento, por lo que cada prueba requirió de ser recirculada muchas veces para estar en contacto con el medio filtrante.



Fuente: Resultados de pH del agua aireada en la cascada en contacto con piedra volcánica.

7.2. SEGUNDA EVALUACIÓN

AIREACIÓN DE AGUA EN CONTACTO CON PIEDRA VOLCÁNICA

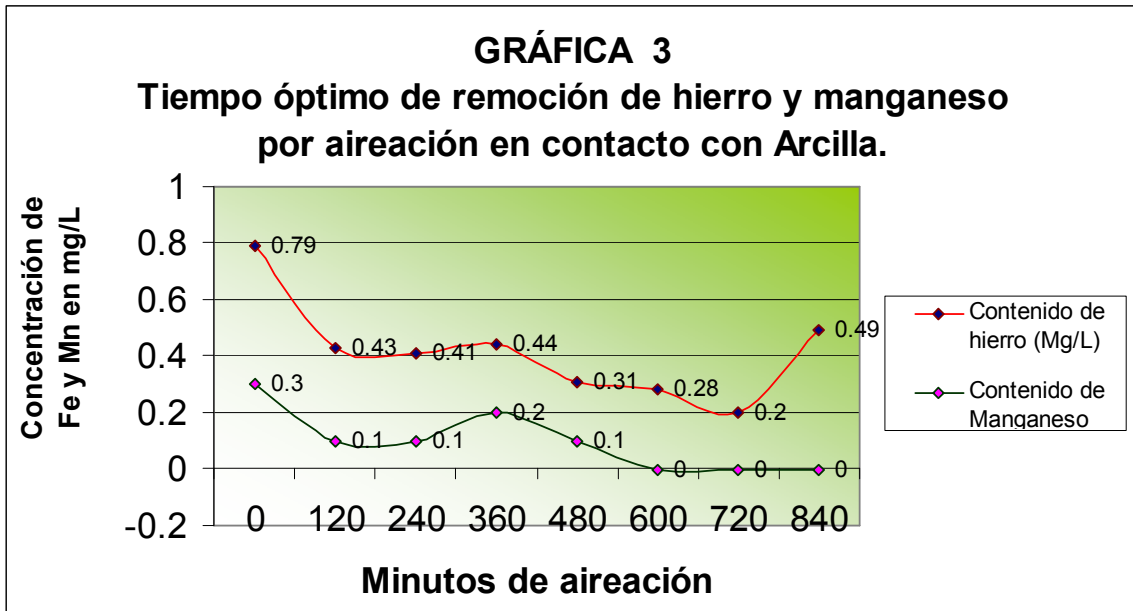
Esta segunda evaluación consistió en someter el agua cruda con concentraciones de Fe^{+2} y Mn^{+} , a aireación en los sistemas de la cascada construida, disponiendo en cada contenedor de arcilla como medio de contacto.

No. Muestra	TIEMPO (MIN)	Contenido de hierro (Mg/L)	Contenido de Manganeso (Mg/L)	pH	°C	% eficiencia remoción de hierro	% eficiencia remoción de manganeso
0	0	0,79	0,3			0	0
1	120	0,43	0,1	7,9	25,5	45,57	66,67
2	240	0,41	0,1	7,8	25,7	48,10	66,67
3	360	0,44	0,2	7,7	25,8	44,30	33,33
4	480	0,31	0,1	8	25,7	60,76	66,67
5	600	0,28	0	7,4	25,7	64,56	100,00
6	720	0,2	0	7,4	25,9	74,68	100,00
7	840	0,49	0	7,4	25,9	37,97	100
	3360 minutos totales 56 Horas 2,3 Días						

Fuente: Resultados de la aireación del agua cruda con Fe^{+2} y Mn^{+} en contacto con la arcilla.

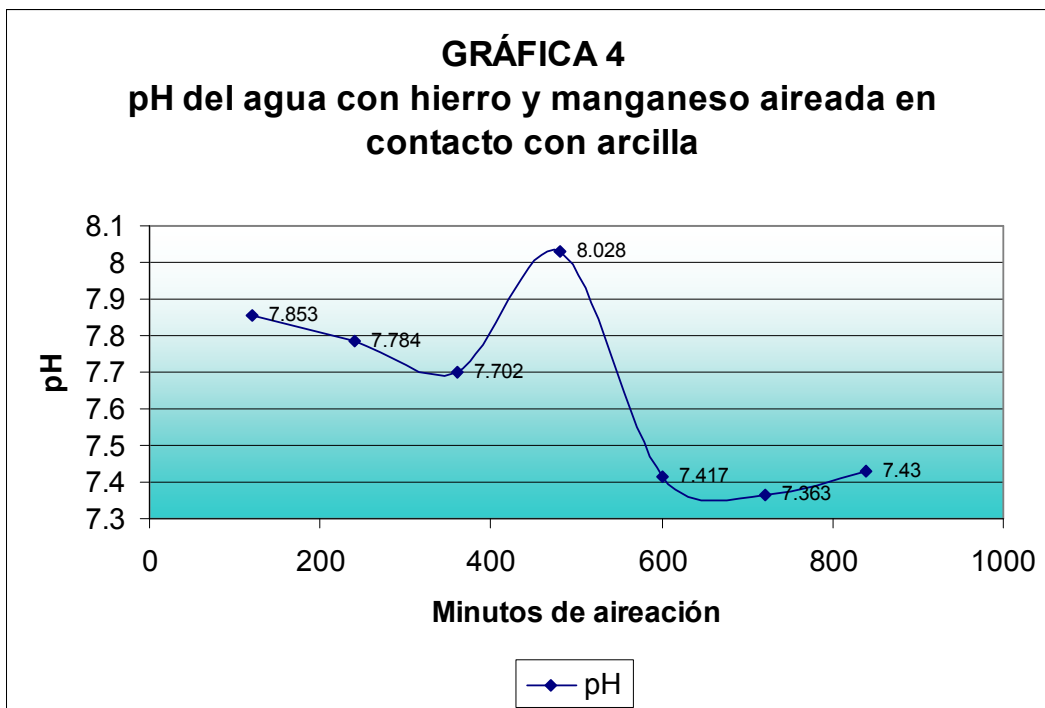
La arcilla puede llegar a remover el 100% de la concentración y Mn^{+} y el 74.68 % de Fe^{+2} .

Esta prueba presenta mejores resultados en comparación a la primera evaluación con piedra volcánica; la cual es capaz de remover Mn^{+} , pero no Fe^{+2} , de forma conjunta para ambos elementos como se reporta en este análisis.



Fuente: Resultados de los tiempos óptimos de aireación del agua cruda con Fe^{+2} y Mn^{+} en contacto con la arcilla.

El tiempo de aireación en la segunda evaluación con arcilla como medio de contacto fue de 3,360 minutos de aireación total; determinándose 720 minutos como tiempo óptimo de operación para la Fe^{+2} y Mn^{+2} ;



Fuente: pH del agua cruda con hierro y manganeso, durante la aireación en la cascada en contacto con arcilla

Las condiciones de pH también influyeron a que el proceso de remoción fuera muy lento, por lo que cada prueba requirió de ser recirculada muchas veces para estar en contacto con el medio filtrante, lo cual limita a poder instalar una o varias cascadas en serie a la salida de un pozo contaminado con dichos elementos, para la remoción inmediata de los mismos.

7.3. TERCERA EVALUACIÓN

AIREACIÓN DE AGUA EN CONTACTO CON PIEDRA PÓMEZ

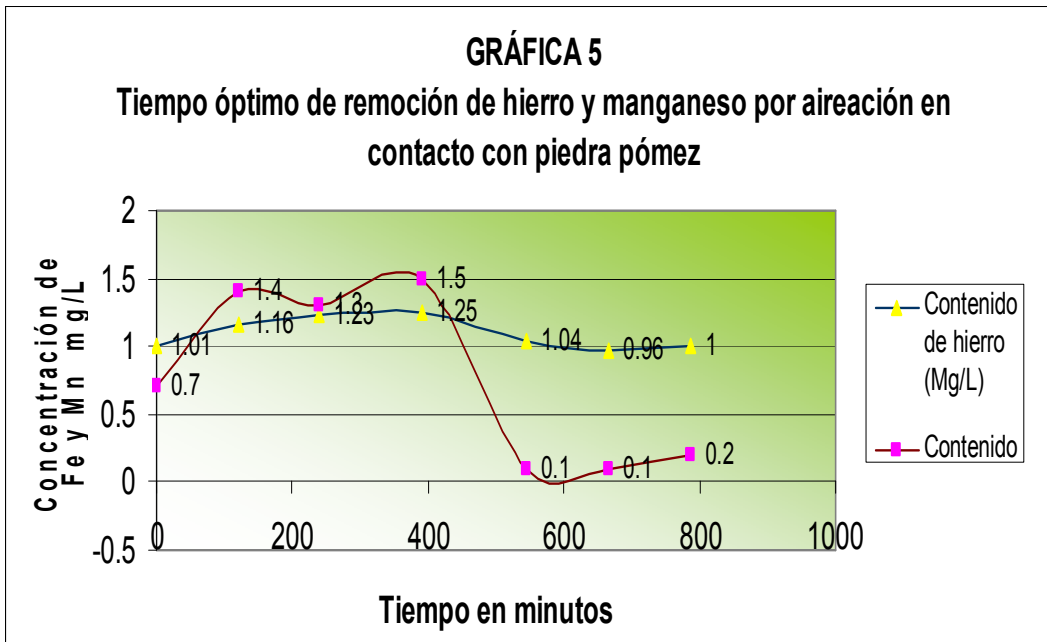
La piedra pómez utilizada en esta prueba, fue recolectada en las orillas del mar. Su contenido químico ayudo a elevar el pH para provocar la oxidación de los elementos químicos contaminantes.

TABLA VI PARAMETROS DE OXIDACIÓN DE Fe Y Mn, EN CONTACTO CON PIEDRA PÓMEZ Y AIRE							
No. Muestra	TIEMPO (MIN)	Contenido de hierro (Mg/L)	Contenido de Manganese (Mg/L)	pH	°C	% eficiencia remoción de Hierro	% eficiencia remoción de Manganese
0	0	1,01	0,7	7,175	25,6	0	0
1	120	1,16	1,4	7,545	25,6	-14,85	-100,00
2	240	1,23	1,3	8,097	25,9	-21,78	-85,71
3	390	1,25	1,5	7,06	25,8	-23,76	-114,29
4	546	1,04	0,1	7,062	25,4	-2,97	85,71
5	666	0,96	0,1	7,531	25,6	4,95	85,71
6	786	1	0,2	7,231	25,6	0,99	71,43
	2,748	MINUTOS TOTALES AIREADOS					
	45,8	HORAS DE AIREACIÓN					
	1,91	DÍAS DE AIREACION					

Fuente: Resultados de la aireación de agua en contacto con piedra pómez recolectada en el mar.

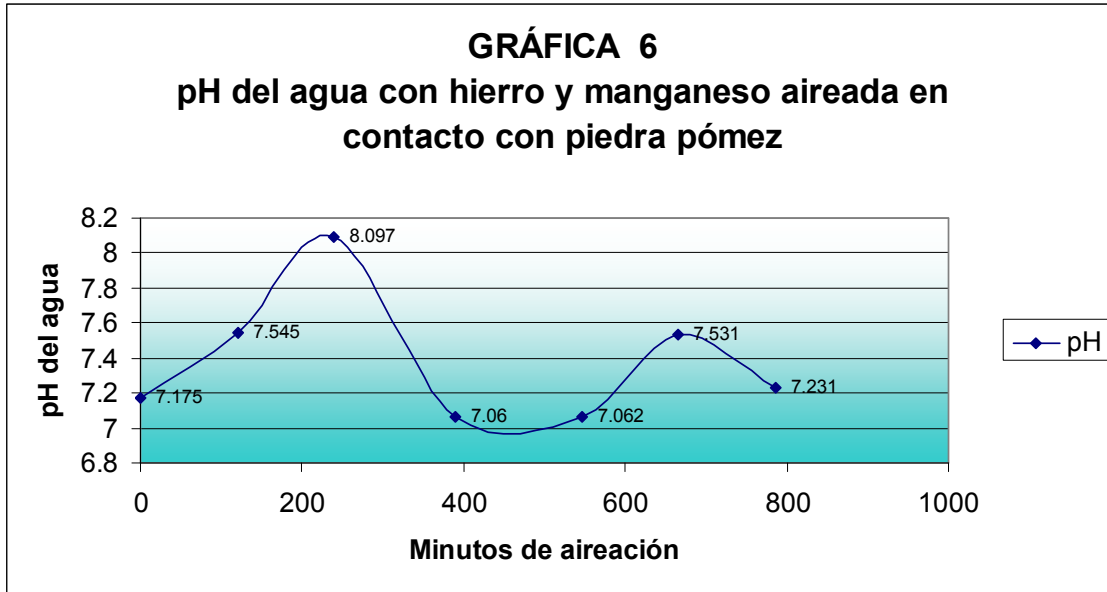
La piedra pómez removió el 4.95% de hierro y el 85.71% de Mn^{+2} a los 666 minutos de aireación, a un pH de 7.53 y con 7,218 vueltas en contacto con el medio.

El tiempo de aireación de la tercer evaluación fue de 2,748 minutos de aireación total utilizando como medio de contacto piedra pómez; siendo 666 minutos el tiempo optimo de operación de aireación para la remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2} .



Fuente: Resultados de tiempos óptimos de aireación de agua en contacto con piedra pómez recolectada en el mar.

La oxidación del hierro por aireación, fue favorable debido a que el pH del agua se encontró por encima de 7.1 e idealmente se mantuvo entre 7.5 y 8.0; esto retardo un poco la remoción, pero los resultados están en porcentajes aceptables.



Fuente: Resultados de pH del agua con Fe y Mn aireada en contacto con piedra pómez recolectada en el mar.

Las condiciones de pH en esta prueba fueron óptimas para la remoción de manganeso. Pero los descensos que se observan en la grafica 6; llegan al mínimo permisible = 7.2, el cual no favoreció la remoción del hierro en el agua cruda.

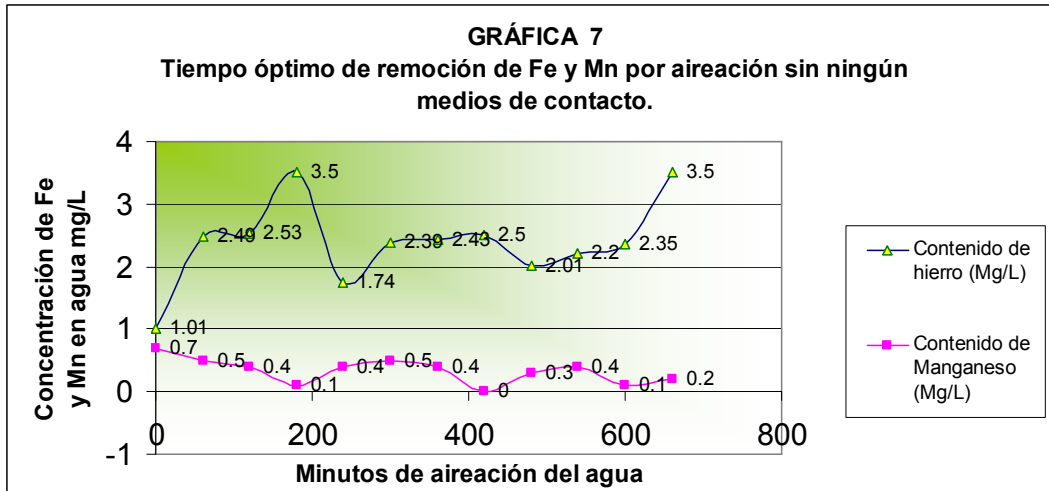
7.4 CUARTA EVALUACIÓN

AIREACIÓN DE AGUA SIN MEDIO DE CONTACTO MUESTREO TESTIGO

TABLA VII PARÁMETROS DE OXIDACIÓN DE Fe Y Mn, EN CONTACTO SÓLO CON AIRE							
No. Muestra	TIEMPO (MIN)	Contenido de hierro (Mg/L)	Contenido de Manganeso (Mg/L)	pH	°C	% eficiencia remoción de Hierro	% eficiencia remoción de Manganeso
0	0	1,01	0,7	7,175	25,6	0	0
1	60	2,49	0,5	8,335	25,6	-146,53	28,57142857
2	120	2,53	0,4	8,603	25,5	-150,50	42,85714286
3	180	3,5	0,1	8,143	25,6	-246,53	85,71428571
4	240	1,74	0,4	8,527	25,6	-72,28	42,85714286
5	300	2,39	0,5	8,464	25,6	-136,63	28,57142857
6	360	2,43	0,4	8,442	25,7	-140,59	42,85714286
7	420	2,5	0	8,489	25,8	-147,52	100
8	480	2,01	0,3	8,487	25,8	-99,01	57,14285714
6	540	2,2	0,4	8,293	25,9	-117,82	42,85714286
7	600	2,35	0,1	8,453	26	-132,67	85,71428571
8	660	3,5	0,2	8,519	26,1	-246,53	71,42857143
	2,700		MINUTOS TOTALES AIREADOS				
	45		HORAS DE AIREACIÓN		3.5= por encima		
	1.88		DÍAS DE AIREACION		de rango		

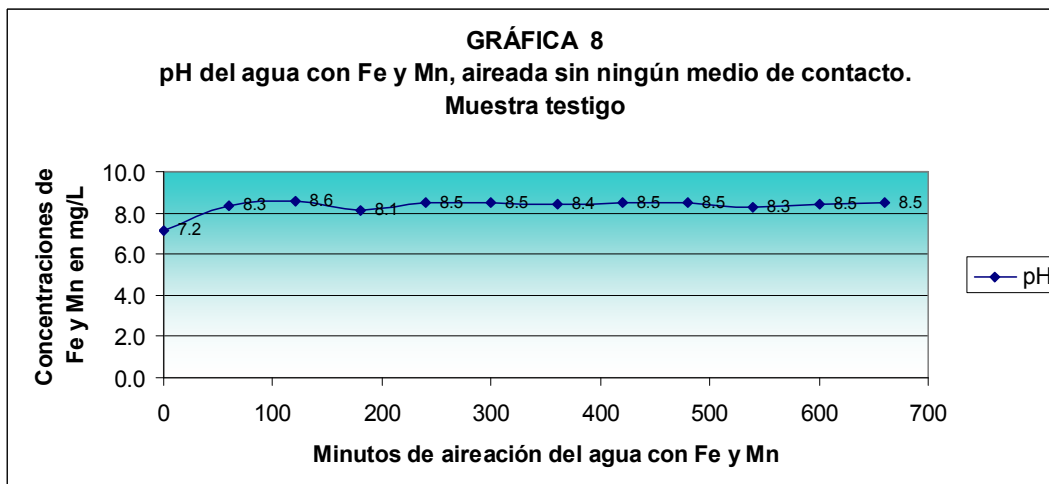
Fuente: Resultados de la aireación de agua cruda con Fe^{+2} y Mn^{+2} , en la cascada sin contener medios de contacto.

Esta última prueba de aireación sin medio de contacto removi6 un m6ximo de **100%** y un promedio de 64.3 % de manganeso; remoci6n que no se logr6 en el hierro en donde se increment6 su concentraci6n a 59.4% de la concentraci6n inicial aire6ndolo por 420 minutos. 100% de Mn^{+2} pero en el hierro se increment6 su concentraci6n en 59.4% a los 420 minutos de aireaci6n, a un pH de 8.489 y con 4552.5 vueltas en contacto con el medio.



Fuente: Tiempos óptimos de aireación de agua cruda con Fe^{+2} y Mn^{+2} . en la cascada sin contener medios de contacto.

Como parámetro referencial, se evaluó como muestra testigo la aireación del agua con Fe^{+2} y Mn^{+2} en la cascada tipo escalera sin contener ningún medio de contacto; utilizando para dicha evaluación un tiempo total de operación de 2,700 minutos, siendo 420 los minutos óptimos de operación para la remoción de manganeso únicamente, ya que el hierro se incrementó 59.4% de la concentración inicial.



Fuente: pH del agua cruda con Fe^{+2} y Mn^{+2} . en la cascada sin contener medios de contacto.

La cantidad teórica de aire que se necesita para oxidar y precipitar el hierro y el

manganeso del agua requiere de conocer el pH del agua; que es un parámetro crítico para el proceso de oxidación y precipitación de hierro y manganeso.

Para la oxidación del hierro por aireación, el pH del agua deberá ser de por lo menos 7.2 e idealmente deberá mantenerse entre 7.5 y 8.0

TABLA VIII
pH de los cuatro sistemas evaluados

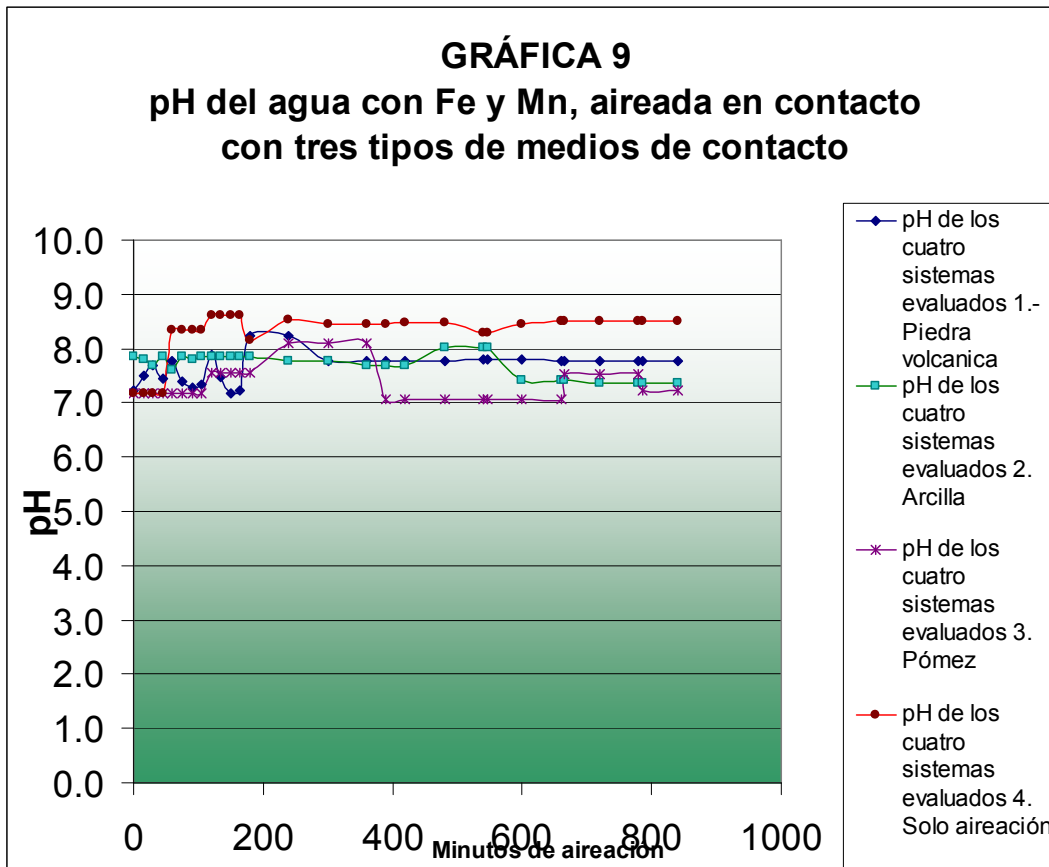
TIEMPO (MIN)	pedra volcánica	Arcilla	Pómez	Solo aireación
0	7.239	7.853	7.175	7.175
15	7.494	7.8	7.175	7.175
30	7.691	7.7	7.175	7.175
45	7.447	7.853	7.175	7.175
60	7.771	7.6	7.175	8.335
75	7.38	7.853	7.175	8.335
90	7.293	7.8	7.175	8.335
105	7.34	7.853	7.175	8.335
120	7.877	7.853	7.545	8.603
135	7.48	7.853	7.545	8.603
150	7.166	7.853	7.545	8.603
165	7.222	7.853	7.545	8.603
180	8.224	7.853	7.545	8.143
240	8.224	7.784	8.097	8.527
300	7.769	7.784	8.097	8.464
360	7.769	7.702	8.097	8.442
390	7.769	7.702	7.06	8.442
420	7.7775	7.702	7.06	8.489
480	7.7775	8.028	7.06	8.487
540	7.786	8.028	7.06	8.293
546	7.786	8.028	7.062	8.293
600	7.786	7.417	7.062	8.453
660	7.759	7.417	7.062	8.519
666	7.759	7.417	7.531	8.519
720	7.759	7.363	7.531	8.519
780	7.759	7.363	7.531	8.519
786	7.759	7.363	7.231	8.519
840	7.759	7.363	7.231	8.519

Fuente: Resultados de pH del agua cruda aireada bajo cuatro condiciones diferente.

Si hay manganeso presente, el pH mínimo recomendado es de 9.5 Por debajo de ese nivel de pH, la oxidación del manganeso por aireación se vuelve bastante lenta. En aguas de reducido pH o con bajos niveles de alcalinidad, podrá ser

necesario agregar materiales alcalinos suplementarios, tal como hidróxido de sodio, a fin de elevar el pH del agua. En este estudio no se requirió de tal acción, ya que las condiciones las mejoró el contacto que el agua tenía con los tres tipos de medios de contacto utilizados.

Las velocidades de oxidación no son rápidas y, por lo tanto, las formas reducidas pueden persistir por algún tiempo en las aguas aireadas; esto es especialmente cierto cuando el pH es inferior a 6 para la oxidación del hierro, y menor que 9 para la oxidación del manganeso.



Fuente: pH del agua cruda con Fe^{+2} y Mn^{+2} , aireada en la cascada con cuatro diferentes condiciones.

La oxidación del hierro y del manganeso por aireación no es instantánea. Por este motivo, se aconseja emplear un tanque de retención o contacto que permita suficiente tiempo de permanencia para que la oxidación y precipitación sean completas. Dependiendo de cuáles sean las condiciones reales, los tiempos de contacto pueden variar entre 15 y 720 minutos.

Eficiencias de remoción

La eficiencia adquirida en los diferentes procesos fue satisfactoria a excepción de la prueba sin ningún medio de contacto, por lo que se puede definir que los medios de contacto utilizados (piedra volcánica, pómez y arcilla) fueron de fundamental importancia en el proceso. Ya que la composición química que constituye dichos medios contribuyeron a incrementar el pH del agua para favorecer la oxidación del Fe^{+2} y Mn^{+2} por oxidación. Los compuestos que interactuaron en el agua y la piedra volcánica fueron los componentes químicos como los silicatos (SiO_4^{-4}); estos están compuestos por silicio y oxígeno; estos dos elementos, más los iones aluminio, calcio, sodio, potasio, magnesio y hierro. Debido a que la piedra volcánica es rica en hierro al incrementar los tiempos de aireación hay una reacción directamente proporcional, de tal forma que se incrementa también la concentración de Fe.

En la piedra pómez, intervino principalmente trióxido de sílice SiO_2 , y trióxido de aluminio Al_2O_3 entre otros componentes Fe_2O_3 , CaO , Na_2O , K_2 , H_2O .

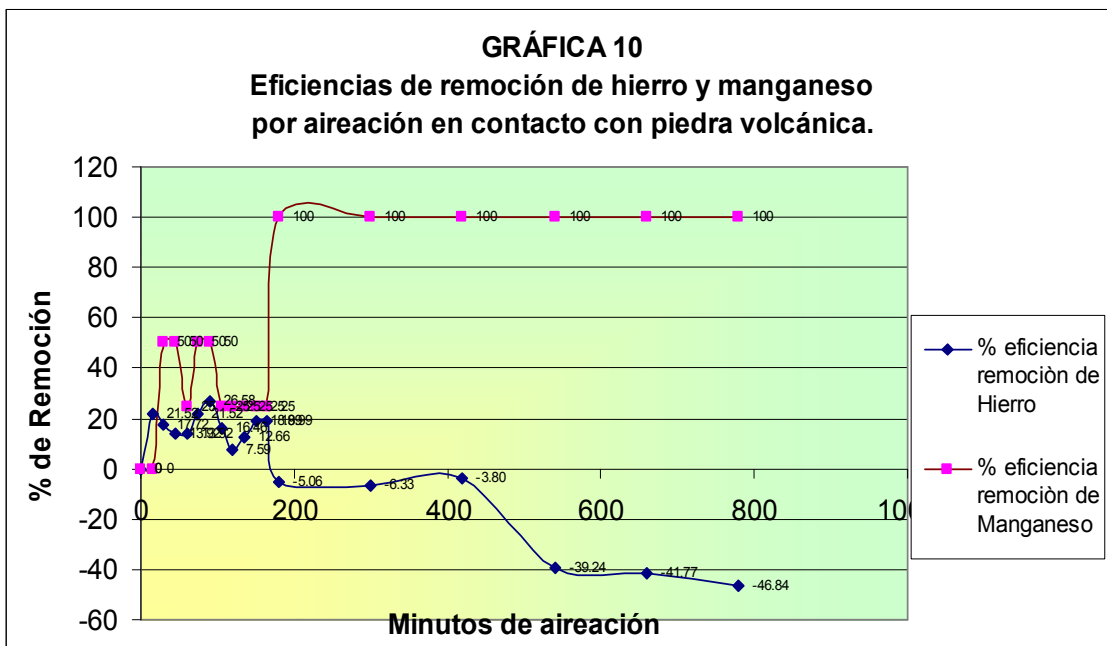
Y con la arcilla: intervino la presencia de Silicio (Si) y Aluminio (Al) combinada químicamente con el agua. La arcilla pura es una combinación de una molécula de alúmina, dos moléculas de sílice y dos de agua: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

TABLA IX

parámetro	piedra volcánica		Arcilla		Piedra pómez		Sin medio de contacto	
	% eficiencia remoción de Hierro	% eficiencia remoción de Manganeseo	% eficiencia remoción de Hierro	% eficiencia remoción de Manganeseo	% eficiencia remoción de Hierro	% eficiencia remoción de Manganeseo	% eficiencia remoción de Hierro	% eficiencia remoción de Manganeseo
Mínimo	7.6	25.0	38.0	33.3	-23.8	-14.3	-46.5	28.6
Máximo	26.6	100.0	74.7	100.0	5.0	85.7	-72.3	100.0
Promedio	17.1	62.5	56.3	66.7	-9.4	-14.3	-59.4	64.3

Fuente: Eficiencias de la remoción de hierro y manganeso. Nota: los valores negativos corresponden al porcentaje de incremento de la concentración de hierro.

La eficiencia de remoción de hierro para el sistema de aireación, en régimen con la evaluación con piedra volcánica, varió entre valores mínimos de 7.59 % y valores máximos de 26.58 % de remoción de fe con promedios de 17.085%.



Fuente: Eficiencias óptimas de remoción Fe^{+2} y Mn^{+2} . en la cascada de aireación en contacto con piedra volcánica.

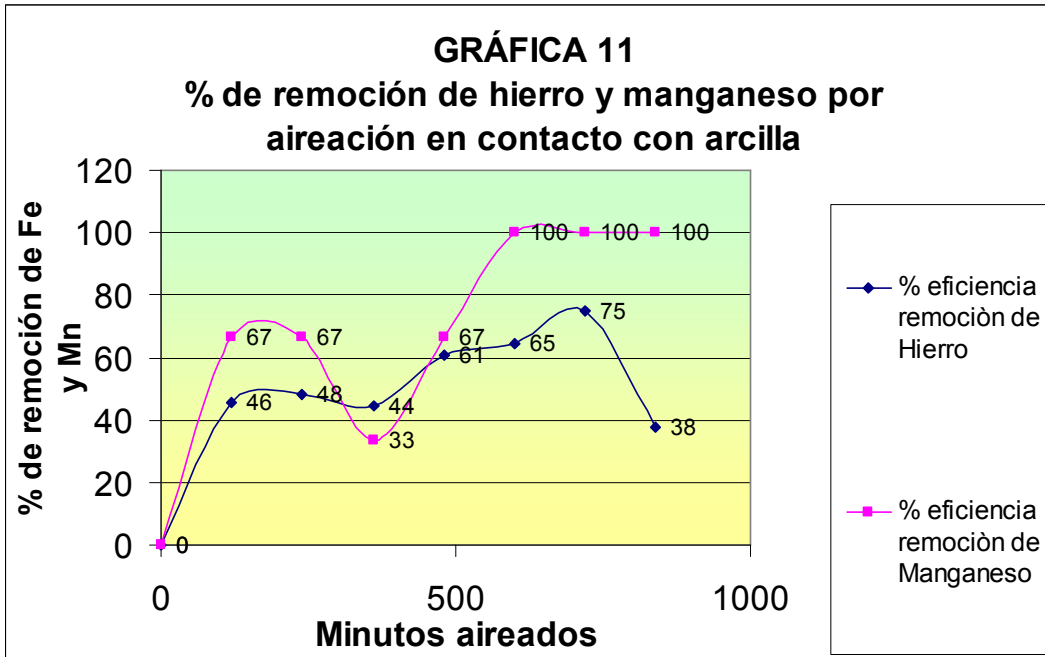
Se puede observar que la remoción del manganeso se obtuvo valores mínimos de 25 a 100% de remoción con un promedio de 75% de remoción de manganeso. El sistema de aireación en contacto con la piedra volcánica es efectivo para la remoción de manganeso, no teniendo las mismas propiedades de remoción para el hierro, debido a que la piedra volcánica es rica en hierro. Por lo que a mayor exposición y contacto con la piedra, mayor será la concentración de hierro en el agua.

Notar en la gráfica que en tiempos prolongados de aireación mayor a 180 minutos en exposición con el aire; el hierro puede incrementar su concentración.

Observar que la remoción del hierro y manganeso en la segunda prueba con arcilla como medio de contacto; varió entre 28 y 74.7 % en la remoción de hierro, con un promedio de 56.3%; mientras que para el manganeso ésta fue muy variable, desde 33.3 a 100 %, con un promedio de 66.7% de remoción.

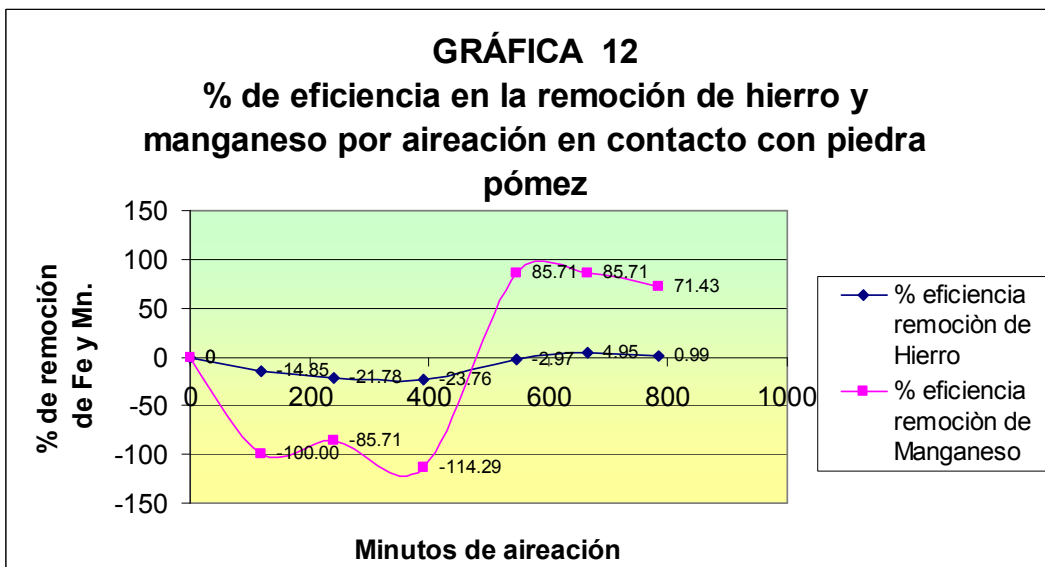
Esta segunda evaluación presentó mejores resultados en este proceso de aireación utilizando arcilla como medio de contacto debido a que se presentaron resultados de remoción de hierro y manganeso en cantidades considerables y forma simultánea para ambos elementos.

La remoción de hierro se produce por una combinación de procesos fisicoquímicos y biológicos, mientras que para la remoción de manganeso predominan los procesos biológicos.



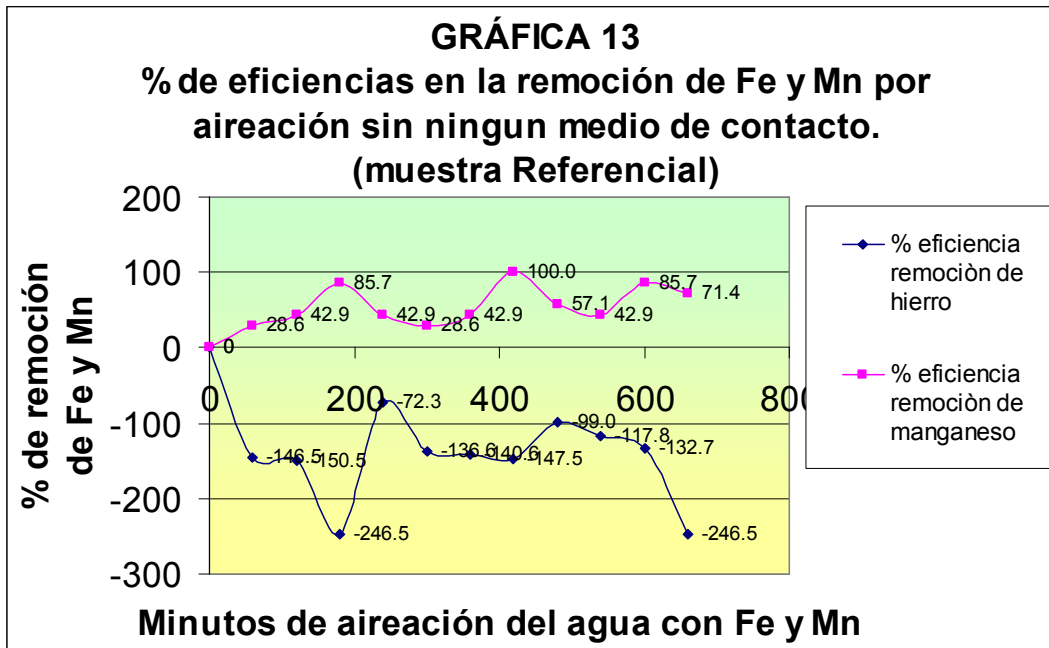
Fuente: Eficiencias óptimas de remoción Fe^{+2} y Mn^{+2} . en la cascada de aireación en contacto con arcilla.

En la tercera evaluación de remoción por aireación en contacto con piedra pómez; las eficiencias de remoción del hierro fue de 5.%, y de hasta 85.71% para el manganeso, detectándose también incrementos hasta del 14.3% al ser expuesto a mucho tiempo de aireación.



Fuente: Eficiencias óptimas de remoción Fe^{+2} y Mn^{+2} . en la cascada de aireación en contacto con piedra pómez.

En la cuarta y última evaluación para determinar coeficientes de oxidación de hierro y manganeso, fue sin medio de contacto; en esta evaluación las eficiencias de remoción fueron favorables para el manganeso, obteniéndose eficiencias desde el 28.6 a 100% de remoción de Mn, pero para el hierro 0%; determinándose incrementos de hasta el 72.3% de la concentración inicial de Fe.



Fuente: Eficiencias óptimas de remoción Fe^{+2} y Mn^{+2} . en la cascada de aireación sin medio de contacto.

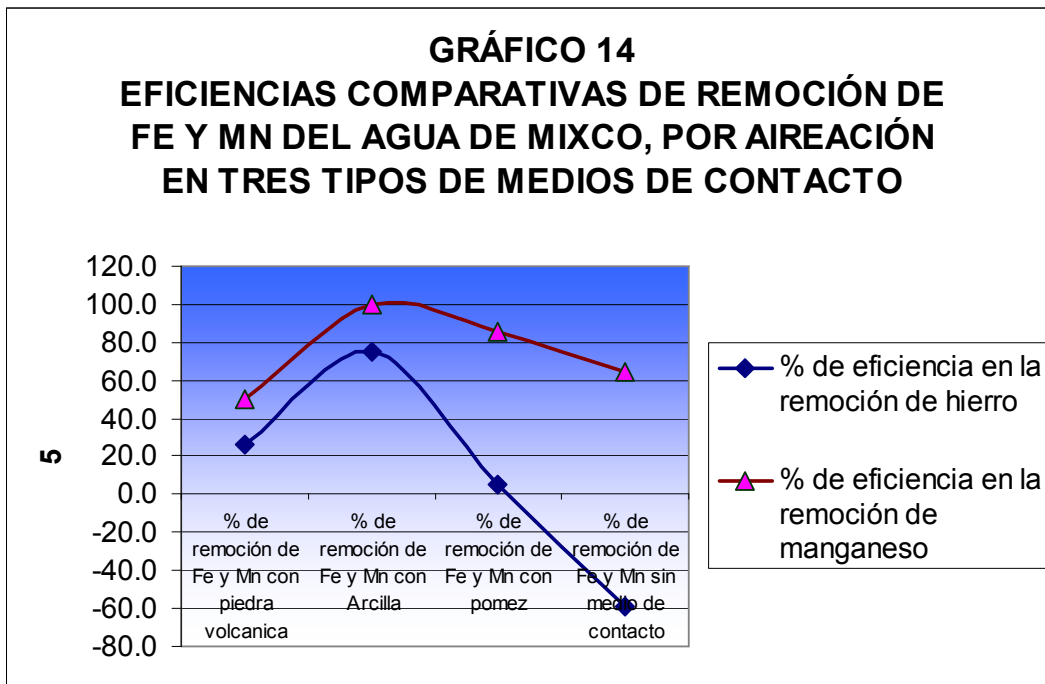
Las cuatro evaluaciones se presentan en la siguiente gráfica, en la que se determinan que se pueden notar que la arcilla es la que mejores resultados de eficiencia de remoción presenta, seguida de la piedra volcánica y los últimos dos sistemas de aireación con piedra pómez y sin medio de contacto son de utilidad únicamente para remover el manganeso, no así para el hierro.

TABLA X

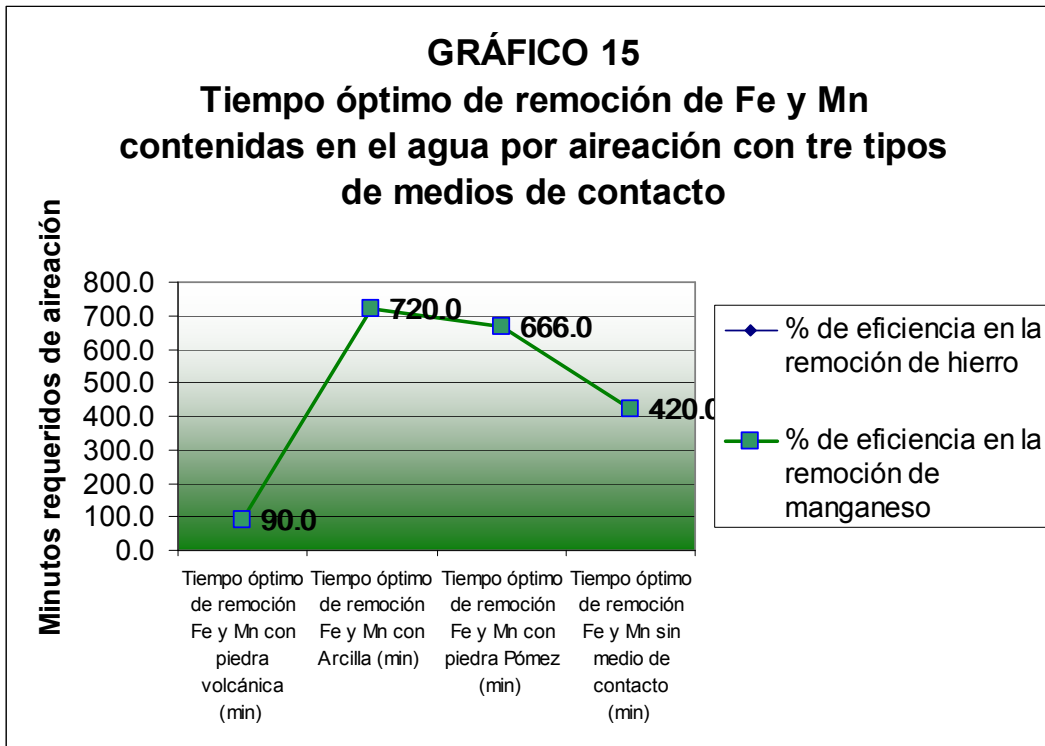
Descripción	piedra volcánica		Arcilla		Piedra pómez		Sin medio de contacto	
	% de remoción promedio	Tiempo en minutos	% de remoción promedio	Tiempo en minutos	% de remoción promedio	Tiempo en minutos	% de remoción promedio	Tiempo en minutos
% de eficiencia en la remoción de hierro	26.6	90.0	74.7	720.0	5.0	666.0	-59.4	420.0
% de eficiencia en la remoción de manganeso	50.0	90.0	100.0	720.0	85.7	666.0	64.3	420.0

Fuente: Porcentajes de remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2} en los cuatro sistemas evaluados

Esta grafica, describe una comparación directa entre los cuatro métodos evaluados, y se observa en la misma que la arcilla es la que mejores resultados de remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2} presentaron.



Fuente: Eficiencias óptimas de remoción Fe^{+2} y Mn^{+2} . comparadas para los cuatro sistemas evaluados.



Fuente: Tiempos óptimos de remoción Fe^{+2} y Mn^{+2} comparados para los cuatro sistemas evaluados

Condiciones de temperatura durante la aireación utilizada

Este parámetro influye decisivamente, en el desarrollo del mecanismo de aireación en sus diversos lechos filtrantes, y por lo tanto, afecta en la eficiencia y productividad del agua, consumiéndola durante su proceso de aireación, y reduciendo el volumen.

El proceso se desarrollo a temperatura ambiente. $25^{\circ}C$; y en el caso de la piedra volcánica, al provocar mucha turbulencia, el contenido de agua en proceso se fue evaporando y parte se perdió por salpicado.

Para operar el sistema de aireación, con cantidades ideales de oxígeno, las pruebas se realizaron a campo abierto.

RENDIMIENTOS DEL VOLUMEN DE AGUA AIREADA

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{cantidad real de producto}}{\text{cantidad ideal de producto}} \cdot 100$$

% rendimiento aireación con piedra volcánica = 12 litros/30 litros x 100 =40%

% rendimiento aireación con Arcilla = 19litros / 30litros X 100 =63.33%

% rendimiento aireación con piedra pómez = 17 litros / 30 litros X 100 = 56.66%

% rendimiento aireación sin medio de contacto = 23 litros/30litros*100= 76.66%

El aire influye directamente el rendimiento del agua, de tal forma que lo consume durante su aireación.

Las evaluaciones realizadas en el sistema de aireación tipo cascada requirió un volumen de 30 litros de agua para cada prueba con los diferentes medios de contacto; el agua utilizada contenía una concentración de Mn^{+2} que va de 0.3 a 0.7 mg/L, y de hierro desde 0.79 a 1.02. El sistema consta de cinco escalones, en los que se dispone de un contenedor, cada uno con un medio de contacto o lecho filtrante; con las siguientes granulometrías: de 5 a 10 cm de diámetro para piedra volcánica, y de 5 a 10 mm de diámetro para la arcilla y piedra pómez. Estas fueron dispuestas en cada contenedor a una altura de 5 a 10 cm. Los rendimientos encontrados para los tres tipos de medios de contacto y sin medio son: 40%, 63.3%, 56.66% y 76.6% respectivamente (piedra volcánica, arcilla pómez y sin medio).

Este rendimiento fue afectado debido a la evaporación por la temperatura ambiente, y en la piedra volcánica fue menor por el salpicado que generaba al momento de hacer contacto el agua con la piedra, debido a su granulometría. Es importante resaltar que una granulometría menor, puede contribuir a eliminar pérdidas en el proceso y posiblemente reducir el tiempo óptimo de remoción

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se realizaron estudios experimentales en un sistema piloto de aireación tipo cascada, en el cual se utilizó aguas que contienen dichos metales de forma natural. Se obtuvieron altas eficiencias de remoción, mayores al 70 %, tanto para el Fe^{+2} y como para el Mn^{+2} , demostrando que se pueden remover estos metales en forma conjunta sin necesidad de controles sofisticados en la operación.

- a. A los 180 minutos de aireación, se logro el 100% de eficiencia de remoción por aireación del Mn^{+2} , pero del Fe^{+2} por estar mucho tiempo en contacto con la piedra volcánica rica en este elemento, se incrementó 5.06% de la concentración inicial. De acuerdo al a curva de aireación, se determina un tiempo óptimo de 90 minutos para remover el 26.58% de hierro y el 50% de Mn^{+2} . En este tiempo de aireación se logra un buen porcentaje de remoción de ambos elementos, a un pH de 7.29. y con 975 vueltas en contacto con el medio.
- b. La arcilla removió 74.68% de hierro y 100% de Mn^{+2} , de eficiencia de remoción a los 720 minutos de aireación; a un pH de 7.36, y con 7,804 vueltas en contacto con el medio.
- c. La piedra pómez removió el 4.95% de hierro y el 85.71% de Mn^{+2} de eficiencia de remoción a los 666 minutos de aireación, a un pH de 7.53 y con 7,218 vueltas en contacto con el medio.
- d. La última aireación sin medio de contacto removió un máximo de eficiencia del 100% y un promedio de 64.3 % de manganeso; remoción que no se logro en el hierro en donde se incrementó su concentración a 59.4% de la concentración inicial aireándolo por 420 minutos.100% de Mn^{+2} , pero en el hierro se incrementó su concentración en 59.4% a los 420 minutos de aireación, a un pH de 8.489 y con 4552.5 vueltas en contacto con el medio.

De estos datos se concluye que el sistema que mejores resultados de remoción de hierro y manganeso presentó es la aireación con arcilla como medio de

contacto, a pesar de ser la que mayor tiempo de aireación requiere= 720 minutos. La arcilla es la que mejores resultados de por transferencia de gases a partir de la aireación y transferencia de iones por adsorción tiene al entrar en contacto con la arcilla (Eficiencias Fe= 74.68% Mn= 100%).

La oxidación del hierro por aireación, fue favorable debido a que el pH del agua se encontró por encima de 7.1 e idealmente se mantuvo entre 7.5 y 8.0; esto retardo un poco la remoción, pero los resultados están en porcentajes aceptables.

Este estudio tiene como ventaja que se logró remociones mayores al 70 y 90% de Fe^{+2} y Mn^{+2} respectivamente; demostrando que con el sistema propuesto se puede remover estos metales en forma conjunta sin necesidad de controles sofisticados en la operación. Sin embargo, los rendimientos en la productividad del agua, no son favorables, ya que durante la aireación se pierden un gran porcentaje de agua, por evaporación ambiental debido a que se requiere de mucho tiempo de aireación, y por absorción del agua por el medio filtrante, y también hay reducción del volumen de agua por pérdidas durante el proceso (salpicado).

Las condiciones de pH también influyeron a que el proceso de remoción fuera muy lento, por lo que cada prueba requirió de ser recirculada muchas veces para estar en contacto con el medio filtrante, lo cual limita a poder instalar una o varias cascadas en serie a la salida de un pozo contaminado con dichos elementos, para la remoción inmediata de los mismos.

El Fe^{+2} y Mn^{+2} afectan no solamente la calidad de agua, sino provocan también una serie de problemas de operación y mantenimiento en todo el sistema de abastecimiento, debido a que forman depósitos en la red de distribución y/o corrosión de las partes metálicas integrantes del sistema de abastecimiento.

Para el consumo humano las aguas ricas en Fe^{+2} y Mn^{+2} , no tiene efectos nocivos para la salud, sin embargo, el agua al ser expuesta al O_2 del aire se hace turbia y coloreada por la presencia de los óxidos de Fe^{+2} y Mn^{+2} y Mn que forman

precipitados coloidales y que son indeseables desde el punto de vista estético, condiciones que con el sistema propuesto se ayudó a mejorar.

El principio general de la cascada diseñada para este estudio consiste en esparcir el agua al máximo y dejarla correr sobre obstáculos para producir turbulencia. La estructura es simple similar a las escaleras, las cuales esparcen el agua y permiten la caída de un nivel a otro.

Lo que ocurrió durante esta evaluación de remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2} , por aireación es una reacción química en la cual el hierro se combina con el oxígeno presente en el aire para formar una sustancia distinta a las originales, siendo esta, un óxido de hierro. Generalmente, la remoción de hierro y manganeso se logra por oxidación de las formas solubles de fierro Fe(II) y manganeso Mn(II) a formas insolubles Fe(III) , Mn(III,IV) y separación de los precipitados por sedimentación y/o filtración.

El origen de una nueva sustancia, como el óxido de hierro en este proceso de aireación, significa que ha ocurrido un reordenamiento de los electrones dentro de los átomos, y se han creado nuevos enlaces químicos. Estos enlaces químicos determinarán las propiedades de la nueva sustancia.

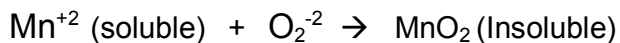
El oxígeno de la atmósfera reacciona con las formas solubles de hierro y manganeso (Fe^{+2} y Mn^{+2}) del agua cruda para producir óxidos relativamente insolubles (Fe^{+3} y Mn^{+4}) de estos elementos. La velocidad de reacción depende del pH de la solución, siendo más rápida a valores de pH altos. Ya que el manganeso tiene una velocidad de oxidación muy lenta vía el O_2 esta técnica no es muy efectiva para la remoción de Mn^{+2} , excepto a valores de pH mayores de 9.5.

Debido a que los resultados demuestran remoción de manganeso, se comprueba que el agua analizada contenía Mn^{+2} , ya que este es soluble y reacciona con el oxígeno para producir óxidos; Mn^{+4} es relativamente insoluble, y de haber sido esta la valencia contenida en el agua no hubiera existido remoción. Para disminuir las concentraciones de manganeso al nivel deseado se requieren frecuentemente un tiempo de reacción y un tratamiento químico adicionales

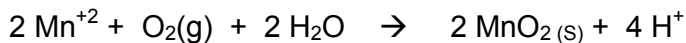
(Sommerrfeld, 1999).

En contacto con el oxígeno disuelto en el agua que contenía hierro y manganeso, durante su aireación; las sales ferrosas se convierten en férricas por oxidación y se precipitan en forma de hidróxido férrico. Esta precipitación es inmediata con un pH superior a 7,5. Con un pH mayor de 2,2, el hidróxido férrico es insoluble. En esta evaluación todos las pruebas realizadas presentaron pH > a 7.2, lo cual favoreció la oxidación. El ión ferroso se oxida a un pH mayor de 6. De acuerdo con ello, las aguas subterráneas, que por estar fuera del contacto con el aire, se encuentran en un medio natural fuertemente reductor— podrán tener en solución cantidades notables de hierro ferroso.

La reacción química de la remoción de hierro en el agua por oxidación se representa así:

$$4 \text{Fe}^{+2} + \text{O}_2^{-2} + 4\text{H}^+ \rightarrow 4 \text{Fe}^{+3} + 2\text{H}_2\text{O};$$


La oxidación de los iones solubles de Fe^{+2} y Mn^{+2} , por aireación se representa:



El hierro y el manganeso en el agua se removió mediante la oxidación de los iones solubles de Fe^{+2} y Mn^{+2} con el uso de oxígeno molecular, sin tener necesidad de utilizar reactivos tales como: cloro residual y permanganato de potasio.

Es un sistema muy sencillo de operar, ya que no requiere mano de obra especializada, y por lo tanto, sus costo de operación son bajos. Otra ventaja del sistema utilizado, es que opera con las condiciones naturales en las que está expuesta las aguas subterráneas, no siendo necesaria la utilización de productos químicos, para elevar su alcalinidad.

Tomando como referencia que el pH idealmente deberá mantenerse entre 7.5 y 8.0 para que ocurra remoción de Fe^{+2} y Mn^{+2} en el agua, en especial si hay manganeso presente, el pH mínimo recomendado es de 9.5; se evaluó también este parámetro para justificar la causa de la remoción lenta en el proceso de aireación. Ver datos comparativos seguidamente:

Tabla XI Tiempos óptimos y % de remoción Fe⁺² y Mn⁺²				
Descripción de las condiciones de evaluación	Tiempo de aireación recomendada	pH	Eficiencia de remoción de Fe	Eficiencia de remoción de Mn
Sistema de aireación1 en contacto con piedra volcánica	90 minutos	7.29	26.58%	50%
	180 minutos	8.22	5.06 %	100%
Sistema de aireación2 en contacto con Arcilla	720 minutos	7.36	74.68 %	100%
Sistema de aireación3 en contacto con piedra pómez	666 minutos	7.531	4.95%	85.71%
Sistema de aireación4 sin medio de contacto	420 minutos	8.489	El hierro se incrementó 59.4%	100% max y promedio de 64.3%

Fuente: Resultados de la aireación del agua con tres tipos de medios de contacto y sin contacto (sólo con aire)

El pH que el agua adquirió con cada medio de contacto influyo en los tiempos así como en el porcentaje de remoción del Fe⁺² y Mn⁺² en el estudio.

La ventaja de este método de remoción es que no se requirió de medios alcalinos suplementarios, para alcalinizar el agua para lograr obtener resultados positivos como los obtenidos; esto debido a que los medio filtrantes utilizados contribuyeron a elevar el pH para la reducción efectiva del Fe^{+2(solubles)} y Mn^{+2(solubles)}, sin necesidad de agregar materiales alcalinos suplementarios, tal como hidróxido de sodio, para elevar el pH del agua.

Al comparar los resultados de eficiencias en la remoción, el sistema que mejores resultados de remoción de Fe⁺² y Mn⁺² presentó es el sistema piloto de aireación con arcilla como medio de contacto, a pesar de ser la que mayor tiempo de aireación requiere (720 minutos) por tener un pH = 7.36 muy cerca de los mínimos especificados de remoción lo cual hizo que el proceso fuera más lento, pero fue el más efectivo: Fe= 74.68% Mn= 100%. , estos resultados se obtuvieron con las siguientes condiciones de diseño de la cascada: h= 2.635m , con un tiempo de caída del sistema completo en contacto con el aire=

1.6389seg, para una cascada de 5 escalones y un tiempo de caída por escalón = 0.27seg, y una altura por escalón = 0.355 m, a una velocidad de 0.0048559 m/s.

El oxígeno que se incorporó al agua durante el proceso de aeración la volvió más corrosiva a medida que el tiempo se incrementaba. Por ello, la aeración no se debe utilizar indiscriminadamente sino solo cuando las finalidades están controladas. Por ello es preciso revisar las curvas de comportamiento de las concentraciones de remoción a través del tiempo de aireación que se presentan en este estudio, en el que se puede comprobar que hay puntos críticos, o de quiebre, en el que el Fe, incrementó su concentración al incrementar el tiempo de aireación.

Con la presencia de manganeso en el agua, se dificultó un poco su oxidación, ya que el pH no se mantuvo en el mínimo recomendado el cual es de 9.5 para su eliminación. Por debajo de ese nivel de pH, la oxidación del manganeso por aireación se volvió bastante lenta. Por lo que para su remoción, los diferentes sistemas muestreados en condiciones diferentes de medios de contacto, requirieron de recircular el agua haciéndola pasar varias veces por los medios de contacto para incrementar la interacción por adsorción entre el agua y piedras volcánica, pómez y arcilla.

Debido a ello el primer muestreo con piedra volcánica necesitó que el agua recirculará 975 veces en contacto con la piedra en los 5 escalones que conformaba la cascada tipo escalera. La arcilla requirió de 7,804 vueltas de aireación para remover Fe^{+2} y Mn^{+2} , por oxidación. La piedra pómez necesito ser recirculada hasta 7,218 veces, y la muestra testigo sin medio de contacto requirió de 4,552.51 veces.

Las cascadas son de fácil construcción, ya que hay disponibilidad y factibilidad de conseguir los materiales, de lo que está construido (madera, tubería y botes) así como medios de contacto "Arcilla", esto hace que la operación de esta cascada sea muy económica, excluyendo el uso de energía por el trabajo mecánico que ejercerá la bomba, para facilitar la recirculación del agua en aireación.

El principio general de la cascada diseñada para este estudio consiste en esparcir el agua al máximo y dejarla correr sobre obstáculos para producir turbulencia. La estructura es simple similar a las escaleras, las cuales esparcen el agua y permiten la caída de un nivel a otro.

Limitaciones del estudio y hallazgos.

La velocidad utilizada para la aireación fue relativamente baja= 0.0048559 m/s; esto ayudo a ser posible la remoción de Fe y Mn, ya que según Mouchet 1992; confirma que para la remoción simultanea de estos dos elementos se deben utilizar velocidades extremadamente bajas. Por lo que es importante tenerlo en cuenta, ya que el incremento de ellas limitará obtener los mismos resultados.

Para adquirir una remoción rapida de Fe y Mn,La eliminación del manganeso mediante un método físico-químico (aireación y filtración de arena) Puede utilizarse también pero la cinética para la oxidación del manganeso es muy lenta cuando $\text{pH} < 9$.

El uso del sistema de aireación tipo cascada para la remoción de manganeso representa una alternativa revolucionaria de tratamiento.

Reduce la utilización de químicos para proporcionar un pH óptimo para a la remoción, tiene como desventajas la utilización de energía y una bomba para la circulación del agua:

El tratamiento es lento;

La cascada diseñada es muy pequeña para tratar volúmenes grandes.

No se requiere de químicos para el tratamiento, pero si de tiempo de aireación y de disponibilidad de la cascada y medios de contacto.

Facilidad de remoción de los metales y manganeso al mismo tiempo, en contacto con la arcilla, pero no para la piedra volcánica y pómez, y sin medio de contacto es menos removida.

CONCLUSIONES

2. Se confirma la hipótesis planteada. Los tiempos de aireación y exposición tienen relación directa con las eficiencias presentadas en los diferentes estudios realizados con la aireación del agua con los diferentes medios de contacto (piedra pómez, arcilla, y volcánica).
3. De los resultados de este estudio, se concluye que el sistema que mejores resultados de remoción de hierro y manganeso presentó es la aireación con arcilla como medio de contacto, a pesar de ser la que mayor tiempo de aireación requiere= 720 minutos. La arcilla es la que mejores resultados de por transferencia de gases a partir de la aireación y transferencia de iones por adsorción tiene al entrar en contacto con la arcilla (Eficiencias Fe= 74.68% Mn= 100%).
4. La oxidación del hierro por aireación, fue favorable debido a que el pH del agua se encontró por encima de 7.1 e idealmente se mantuvo entre 7.5 y 8.0; esto retardó un poco la remoción, pero los resultados están en porcentajes aceptables.

Recomendaciones

Con la aplicación de la experimentación de la remoción del Fe^{+2} y Mn^{+2} del agua a pequeña escala por un sistema de aireación tipo cascada se abren nuevas expectativas en el tratamiento de agua para consumo humano, mediante la eliminación de hierro y manganeso específicos utilizando tratamientos no convencionales, los cuales son de alta eficiencia y son de fácil construcción, operación y mantenimiento; sin embargo para que realmente se tengan buenos resultados, eficiencias y productividad, se recomienda:

1. Apegarse a los tiempos monitoreados en este estudio, si se requiere obtener estos resultados, considerando no solo el tiempo, sino también, la granulometría, altura del medio de contacto, condiciones de diseño de la cascada; tiempo de contacto con el aire, caudal y velocidad del flujo.
2. Reducir los tiempos de contacto, haciendo evaluaciones incrementando la altura de medio de contacto de arcilla en cada contenedor de la cascada. Esto reducirá en número de vueltas que hay que recircular y exponer el agua a la arcilla.
3. Hacer estudios posteriores del comportamiento de la arcilla al ser utilizada en grandes cantidades de agua por mucho tiempo de operación, ya que puede presentarse un crecimiento del grano en función de los óxidos acumulados en la superficie o una posible fracturación a consecuencia del lavado; que puede llegar a afectar los resultados de remoción, por motivos de saturación.
4. Para disminuir costos en reactivos, este proceso de aireación, y de filtración por contacto, es muy recomendable para remover Fe^{+2} y Mn^{+2} del agua que tiene alta concentración de hierro (mayor de 5 mg/L).

BIBLIOGRAFÍA

1. Ada Barrenechea Martel. Manual de la Cepis. ASPECTOS FISICOQUÍMICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA. Capítulo 1 Quím. Página 33 -34
2. Canepa V. 1982. Remoción de hierro y manganeso en el área rural. Tecnologías apropiadas para la elevación de agua. Cepis
3. Clair N. Sawyer. Perry L. Mc Carty Gene F. Parkin. 2001. Química para ingeniería ambiental Cuarta edición. Capítulo 26 página 624-630. Editorial McGraw-Hill. cuarta edición. Colombia
4. Frank N. Jemmer & John Mccallion. 1989. Manual del agua. Nalco Chemical company. Tomo II. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. Tomo II.- Mc GRAW-HILL interamericana de México S.A. Tomo II. Sección 16-1
5. Guía para la calidad del agua potable. 1987. Volumen 2 . Criterios relativos a la salud y OPS. Organization Panamericana de la Salud Vol 2 pagina 288.
6. Guías para la calidad del agua potable. 1995. segunda edición volumen 1 organización mundial para la salud pagina 31
7. Lidia de Vargas. Manual de la Cepis. Capítulo 3, Procesos unitarios y plantas de tratamiento. Pág 108.
8. Ligia Cánepa de Cargas. Jun 1992. Manual 1 . Teoría y evaluación. Cepis. Pág 59
9. Norma Guatemalteca, obligatoria. Agua para consumo humano.29005:99
10. Romero Rojas, Jairo Alberto. 1999. Fe y Mn. 2da. edición Editorial Alfa Omega . México.
11. Recopilado de internet y disponible en:
<http://www.ingenieroambiental.com/4014/remo.pdf>
12. Pérez Carrión, José. 1992. Manual 1 de la Cepis, El agua – Calidad y Tratamiento para consumo humano. Página. 43-44
13. Recopilado de internet y disponible en:
http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/casado/GEORED/Endogenas/igneas.htm
14. Recopilado de internet y disponible en: <http://www.lenntech.es/processes/iron-manganese/iron-removal.htm#ixzz12aYQpx7G>
15. Recopilado de internet y disponible en:
<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/011938/011938-03.pdf>

16. Recopilado de internet y disponible en:
Arcilla:<http://html.rincondelvago.com/caracterizacion-fisico-quimica-de-arcillas-de-uso-industrial.html>
17. Recopilado de internet y disponible en: Piedra volcánica:
http://es.wikipedia.org/wiki/Roca_%C3%ADgnea
18. Recopilado de internet y disponible en: Piedra pómez:
http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/publicaciones/publi_rocas/pomez.htm
- 19.** Recopilado de internet y disponible en:
<http://www.ingenieroambiental.com/4014/remo.pdf>
20. Richter, Carlos, Julio 1992. Manual III de la cepis. Teoría Coagulación. Pag 19.
21. Sawey Clair N. / McCarty, Perry L. 1967. Chemistry for sanitary Engineers. McGraw Hill Book Company. Second Edition. Kogakusha company. LTd Tokio
- 22.

ANEXO 1

✓ **CONSIDERACIONES GENERALES PARA UTILIZAR ESTE MODELO DE REMOCIÓN DE Fe^{+2} y Mn^{+2} EN CUALQUIER PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA**

Para lograr la eficiencia de remoción del proceso unitario, depende de las siguientes condiciones:

- ✓ Que las sustancias contaminantes; hierro y manganeso estén en sus valencias de oxidación solubles, Fe^{+2} y Mn^{+2} .
- ✓ Que se cumpla con los criterios de altura o distancias requeridas para la aireación del agua al ser transportada por gravedad de un contenedor a otro la cual debe estar a 0.355 m en contacto con el aire
- ✓ Cumplir con las condiciones de diseño del sistema de aireación y del número escalones y contenedores igual a 5; en los que se dispone de un lecho filtrante; con las siguientes granulometrías: de 5 a 10 cm de diámetro para piedra volcánica, y de 5 a 10 mm de diámetro para la arcilla y piedra pómez. A una altura de 5 a 10 cm de altura del material. Para mantener la eficiencia adquirida en este sistema de aireación con arcilla se debe tener en cuenta que la granulometría utilizada en la arcilla fue de 8 mm.
- ✓ Tomar en cuenta que dependiendo de la concentración y forma en que el hierro y manganeso se encuentren presentes en el agua es el tipo de tratamiento recomendado.
- ✓ El oxígeno que se incorpora al agua durante el proceso de aeración puede volverla más corrosiva. Por ello, la aeración no se debe utilizar indiscriminadamente sino solo cuando las finalidades están controladas.
- ✓ Tomar en cuenta cuales son los tiempos óptimos de aireación para cada medio filtrante: 90 minutos para el sistema de aireación con piedra volcánica. 720 minutos para el sistema de aireación con arcilla como medio de contacto. 666 minutos para la remoción por aireación con

piedra pómez como medio de contacto, y 420 minutos de aireación del agua sin ningún medio de contacto.

- ✓ Que el agua a analizar no tenga una concentración fuera de especificación de partículas en suspensión.

- ✓ En futuros estudios es preciso tomar en cuenta los siguientes aspectos:
Para asegurar el control del proceso de aireación el cual consiste en determinar la concentración de oxígeno disuelto, gas carbónico libre, gas sulfhídrico y el valor del pH. El proceso de aireación tendrá éxito si se cumplen las siguientes tres condiciones simultáneamente:
 - Cuando la concentración de oxígeno disuelto está entre 7 y 10 ppm;
 - Cuando la concentración de gas carbónico se ubica entre 3 y 5 ppm;
 - Cuando hay ausencia total de gas sulfhídrico.

Relaciones para establecer el oxígeno teórico requerido para oxidar el fe y manganeso.

1. Hierro : El peso atómico del hierro es 55.847. Cuando una molécula de oxígeno reacciona con cuatro átomos de hierro, el peso de la reacción del hierro es cuatro veces ese peso, o sea 223.39. El peso molecular del oxígeno es 31.999. La relación de la reacción es entonces $(31.999) / (223.39) = 0.1432$.

Esto significa que se requieren 0.1432 mg/l de oxígeno por cada mg/l de hierro (expresado como hierro).

2. Manganeso: El peso atómico del manganeso es 54.938. Cuando dos átomos de manganeso reaccionan con una molécula de oxígeno, el peso de la reacción del manganeso es el doble de ese valor, o sea 109.88. El peso molecular del oxígeno es 31.999. La relación de la reacción es entonces $(31.999) / (109.88) = 0.2912$. Esto significa que se requieren 0.2912 mg/l de oxígeno por cada mg/l de manganeso (expresado como manganeso).

Residual de oxígeno

Deberá inyectarse suficiente aire para poder mantener el residual de oxígeno requerido. Mantener un residual de oxígeno sirve varios propósitos. Primero, suministra un “búfer” de oxígeno **para reaccionar con aumentos repentinos de hierro o manganeso**. Segundo, produce un agua de mejor sabor. En tercer lugar, el aire requerido para mantener el residual de oxígeno facilita el mezclado para que el hierro y el manganeso reaccionen rápida y eficazmente con el oxígeno. Un valor de oxígeno residual aceptado es 5.0 mg/l.

Se deberá inyectar suficiente aire para mantener este nivel. El nivel inicial de oxígeno en aguas que contienen hierro y/o manganeso es generalmente cero. Si hubiera un residual inicial de oxígeno presente, éste deberá restarse del nivel deseado de 5.0 mg/l para determinar la cantidad de oxígeno requerida.

Oxígeno teórico requerido

La cantidad teórica de oxígeno requerida para oxidar el hierro y el manganeso puede calcularse por medio de la siguiente fórmula:

Oxígeno requerido = $X_f \cdot (\text{Fe}) + X_m \cdot (\text{Mn}) + R$, donde

Xf = Factor de reacción del hierro

(Fe) = Concentración de hierro en mg/l

Xm = Factor de reacción del manganeso

(Mn) = Concentración de manganeso en mg/l

R = Residual final de oxígeno = (5.0 - Oxígeno Inicial) en mg/l

Calculando el oxígeno teórico

DATOS: Concentraciones de 0.3 a 0.7 mg /L de Mn, y de hierro desde 0.79 a 1.02. mg /L

(Fe) = 1.02 mg/l, (Mn) = 0.7 mg/l y Oxígeno Inicial = 0.0 mg/l:

0.1432 mg/l de oxígeno por cada mg/l de hierro

0.2912 mg/l de oxígeno por cada mg/l de manganeso

Oxígeno requerido = $(0.1432)(1.02) + (0.2912)(0.7) + (5.0 - 0.0)$

Oxígeno requerido = $0.146064 + 0.20384 + 5.0$

Oxígeno requerido = 5.34 mg por litro de flujo de agua

ANEXOS 2

FASE EVALUATIVA DE LA CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA CASCADA

Como un análisis de factibilidad, se determina los costos de construcción, operación y mantenimiento, con un grado de confiabilidad que nos permite una comparación adecuada, para considerar si se puede recurrir o no a estos métodos y sistema de aireación teniendo en cuenta los costos y capacidad general del mismo.

El análisis de costos de toda la fase de este estudio conlleva a determinar la selección final de los procesos.

TABLA XII ANALISIS DE COSTOS DEL PROYECTO EN ESTUDIO	
Costos de construcción, operación, mantenimiento y análisis	QUETZALES
Costo de construcción directos (insumos: madera, tubo pvc, codos, bomba)	Q3,100.00
Costos de construcción indirectos.	Q2,100.00
Costos de operación	Q1,950.00
Costos de análisis	Q1,950.00
Costos de reactivos de Fe y Mn	Q1,500.00
Costos de Mantenimiento rutinario	Q5,500.00
Costos de Mantenimiento periódico	Q200.00
Otros gastos	Q500.00

Costo total del proyecto construido, operado y analizado Q16,800.00

El sistema de aireación para estas pruebas, fue donado por Infom- Unepar.

Los reactivos y mano de obra fueron aportes de la estudiante.

ANEXO 3. FOTOS DE LAS EVALUACIONES REALIZADAS



Figura 8 . Sistema de aireación tipo cascada



Figura 9 Piedra volcánica decolorada al ser utilizada en el proceso de aireación



Figura 10 Aireación del agua con Fe^{+2} y Mn^{+2} en contacto con arcilla



Figura 11 Aireación del agua con Fe^{+2} y Mn^{+2} en contacto con piedra pómez.