

# TIEMPOS ÓPTIMOS DE REMOCIÓN DE $Fe^{+2}$ y $Mn^{+2}$ POR AIREACIÓN TIPO CASCADA, CON TRES TIPOS DE MEDIOS DE CONTACTO

Katy Elizabeth López Calvillo <sup>1</sup>

**RESUMEN.** En este artículo se muestra un procedimiento experimental a pequeña escala que permite establecer los tiempos óptimos en los que se remueve el hierro y manganeso por transferencia de gases a partir de la aireación y por transferencia de iones a través de la adsorción al entrar en contacto, con tres diferentes medios filtrantes convencionales (Piedra volcánica, arcilla, pómez). En la pruebas realizadas con medios de contacto se obtuvieron resultados muy satisfactorios, lográndose establecer reducciones de  $Fe^{+2}$  y  $Mn^{+2}$  por oxidación por aireación, a niveles mayores al 70% de eficiencia, a tiempos óptimos de operación por aireación iguales a 90, 720, y 666, minutos para cada medio de contacto respectivamente, y 420 minutos para el agua aireada sin ningún medio de contacto. La arcilla removió 74.68% de hierro y 100% de manganeso a los 720 minutos de aireación, considerándose esta evaluación la de mejores resultados de remoción con mayor tiempo de aireación.

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

**ABSTRACT.** In this article it sample an experimental procedure on small scale is developed that allows to establish the optimal times in which it removes the iron and manganese by gas transference from the ventilation and by ion transfer through the adsorption when making contact with three different conventional filtering media (volcanic Stone, clay, pumice). In it realized tests with contact means was obtained very satisfactory results, it establish  $Fe^{+2}$  and  $Mn^{+2}$  reductions by oxidation by ventilation, at efficiency levels majors to 70%, to equal optimal times of operation by ventilation to 90, 720, and 666, minutes for each means of contact respectively, and 420 minutes for the aerated water without means of contact. The clay removed 74,68% of iron and 100% of manganese in 720 minutes of ventilation, It considered that this evaluation had the best results of ventilation time.

## METODOLOGÍA

### Localización del estudio

La ubicación del proyecto en estudio sobre la oxidación de  $Fe^{+2}$  y  $Mn^{+2}$  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 siguiente coordenadas: Coordenadas UTM:15P- 764,875 E - 1,618,934 N Coordenadas Geográficas: 14° 37' 51.07" N, 90° 32' 27.77" O.

## INTRODUCCIÓN

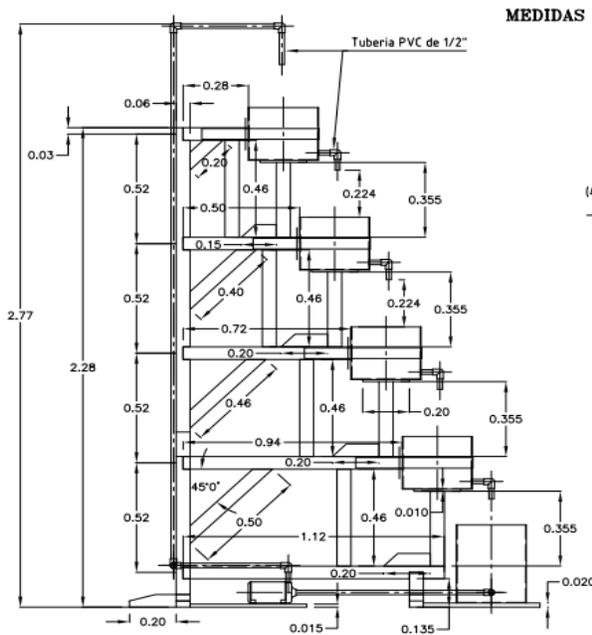
El hierro y manganeso presente en las fuentes de agua subterráneas para abastecimiento público de un pozo del municipio de Mixco, Guatemala; son removidas, mediante un proceso no convencional de aireación tipo cascada; sistema diseñado con cinco contenedores colocados a 0.224mm de distancia uno de otro; disponiendo en su interior de medios de contacto tales como arcilla, piedra volcánica, y piedra pómez, cada una por separado para cada caracterización en la que adicional a los medios de contacto intervino el proceso de aireación de agua cruda con  $Fe^{+2}$  y  $Mn^{+2}$ , proceso en el que según Frank N. Jemmer y John McCallion en el manual del agua de la Nalco, explica que la aireación permite que el agua se esponga al oxígeno, para remover los elementos químicos que la contaminan 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.

**Procedimiento para la experimentación**

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

1.- Se construyó un sistema de aireación tipo cascada con las siguientes especificaciones de diseño:

Figura 1. Diseño de la cascada



2.- Se colocó a cada contenedor un medio de contacto tal como piedra volcánica, piedra pómez y arcilla.

3. Se realizó tres evaluaciones de Aireación de forma independiente, en contacto con piedra Volcánica, Arcilla, y con piedra pómez

**Esquemas pilotos del sistema de Aireación de agua tipo cascada:**

Figura 2. Con piedra volcánica como medio de contacto para remoción de Fe<sup>+2</sup> y Mn<sup>+2</sup>

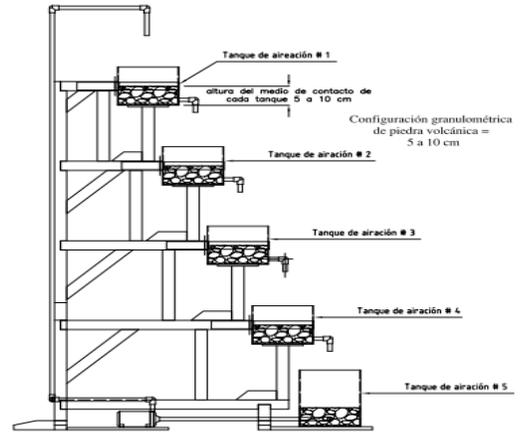


Figura 3. Con piedra Arcilla como medio de contacto para remoción de Fe<sup>+2</sup> y Mn<sup>+2</sup>

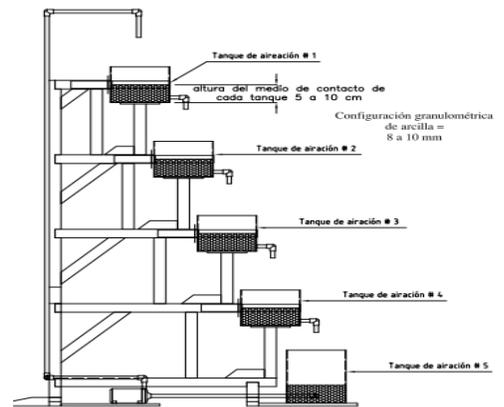
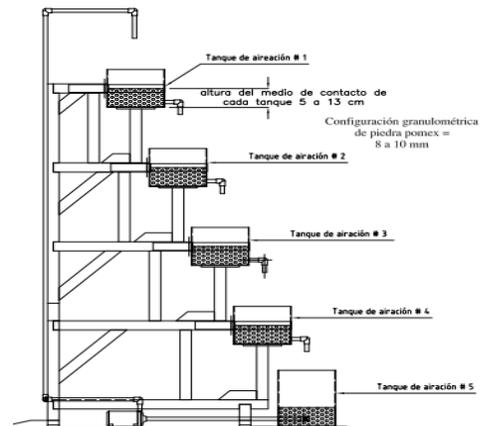


Figura 4. Con piedra pómez como medio de contacto para remoción de Fe<sup>+2</sup> y Mn<sup>+2</sup>



4.- Se analizaron fisicoquímicamente en el laboratorio las concentraciones de hierro y manganeso removido por la aireación en presencia de los tres tipos de medios de contacto.

5.- Se analizaron las curvas de remoción a diferentes tiempos, determinando el tiempo óptimo con las mejores eficiencias de remoción.

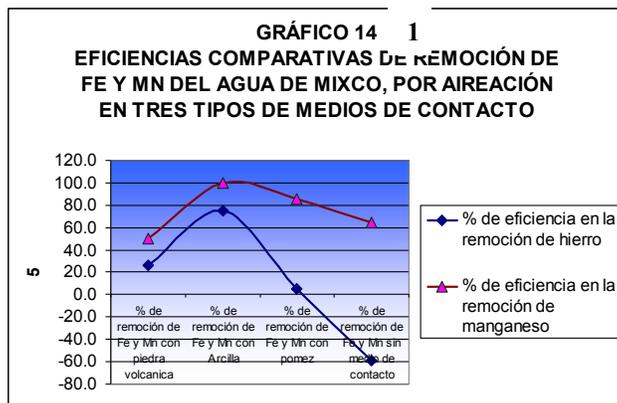
## RESULTADOS

La norma vigente para Agua de consumo humano según Norma Guatemalteca Obligatoria 29 001:99 limita la concentración de hierro a 0.3 mg/L y la del manganeso a 0.05 mg/l; y la norma para el agua Potable, Norma Guatemalteca Obligatoria 29001:99 determina una concentración de 0.1 a 1 mg/l de hierro, y de 0.05 a 0.5 mg/l de manganeso. Debido a estas especificaciones se realizó un estudio experimental para adquirir otros medios que contribuyan a la remoción de Fe<sup>+2</sup> y Mn<sup>+2</sup>.

**Cuadro 1.** Tiempos óptimos de remoción de Fe y Mn.

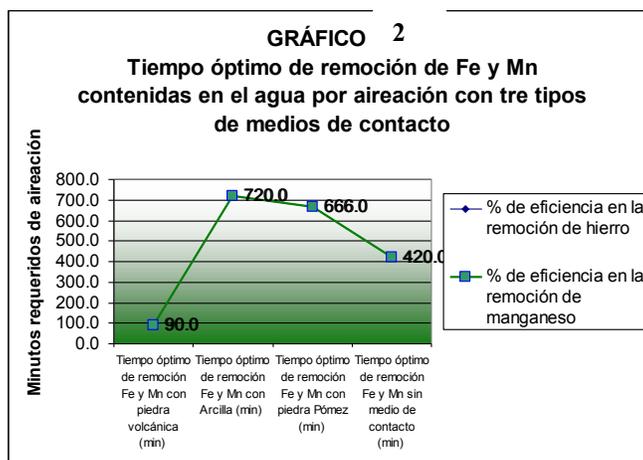
Sistemas de aireación en contacto con :	Tiempo Óptimo de remoción (minutos)	% de eficiencia de Remoción de Fe <sup>+2</sup> (soluble)	% de eficiencia de Remoción de Mn <sup>+2</sup> (Soluble)
Piedra Volcánica	90.00	26.58	50.00
Arcilla	720.00	74.68	100.00
Piedra Pómez	666.00	4.95	100.00
Sin medio	420.00	59.40	64.30

**Gráfica 1.** Eficiencias de remoción de Fe<sup>+2</sup> y Mn<sup>+2</sup> comparativas.



Los valores negativos reflejan el porcentaje de concentración que se incrementó durante la aireación.

**Gráfica 2.** Tiempo óptimo de remoción de Fe<sup>+2</sup> y Mn<sup>+2</sup>



El oxígeno que se incorporó al agua durante el proceso de aireación la volvió más corrosiva a medida que el tiempo se incrementaba. Por ello, la aireación no se debe utilizar indiscriminadamente sino solo cuando las finalidades están controladas. Debido a que hay puntos críticos, o de quiebre, en el que el Fe, incrementó su concentración al incrementar el tiempo de aireación.

**Cuadro 2.** Tiempos totales de operación

Sistemas de aireación en contacto con:	Tiempo de operación total para el muestreo de la curva de remoción por aireación (min)	pH	Numero de vueltas en recirculación y contacto con el medio filtrante (Vueltas)	Rendimiento del agua aireada a los tiempos totales de operación (%)
Piedra Volcánica	3870.00	7.29	975.00	40.00
Arcilla	3360.00	7.36	7804.00	63.30
Piedra Pómez	2748.00	7.53	7218.00	56.66
Sin medio	2700.00	8.49	4552.51	76.60

**Cuadro 3.** Características de diseño de la cascada

Velocidad inicial en la cascada se puede considerar cero.	$V_o = 0$
Altura del escalón	0.355m
Altura de la cascada	2.635 m
Tiempo de caída $t_h$ , en cada escalón de altura $h$ , se calcula por la ecuación: $t_h = \sqrt{(2h/g)}$ .	$h = 0.355m, g = 9.81m/s^2$ $T_h = \sqrt{(2 * 0.355m / 9.81 m/s^2)}$ $T_h = 0.27$ segundos de caída en cada escalón de la cascada.
Aforo del escalón	Aforo a 0.27 seg = 0.118L $0.118L / 0.27seg = 0.437L * 1m^3 / 1000L * A / 0.09m^2 =$ Vel del escalón 0.0048559 m/s
Caudal	$Q = V_o \cdot A = (0.0048559m/s * (0.3m * 0.3m)) = 0.000437m^3/s * 1000L/m^3 =$ $Q = 0.4370L/s$ $N = 5, H = 2.635m$ $\sqrt{(2(2.635m)(5) / 9.81m/s^2)}$ $T_c = 1.6389$ segundos
Tiempo de contacto con el aire $t_c = n \sqrt{(2H/n)/g} = \sqrt{2Hn/g}$ $n =$ numero de escalones individuales de la cascada, $H =$ altura total de la caída	o que el agua tuvo contacto con el aire, en la caída completa de la cascada..

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Lo que ocurrió durante los diversos análisis 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 hierro  $Fe(II)$  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.

Según Sawyer C. & Mc Carty G; 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.

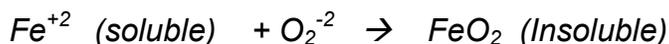
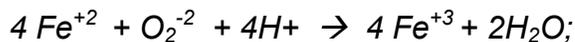
Debido a que los resultados demuestran remoción de manganeso, se comprueba que el agua analizada contenía  $Mn^{+2}$ , ya que este es soluble y reacciona con el oxígeno para producir óxidos;  $Mn^{+4}$  es relativamente insoluble, y de haber sido esta la valencia contenida en el agua no hubiera existido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

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:**



**La oxidación de los iones solubles de Fe<sup>+2</sup> y Mn<sup>+2</sup>, por aireación se representa:**



El Fe<sup>+2</sup> y Mn<sup>+2</sup> en el agua se removieron mediante la oxidación de los iones solubles de Fe<sup>+2</sup> y Mn<sup>+2</sup> con el uso de oxígeno molecular, sin tener necesidad de utilizar reactivos para alcalinizarlo, ya que la remoción es más lenta con pH > 7.2

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, 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.

## CONCLUSIONES

Al comparar los resultados de eficiencias en la remoción, el sistema que mejores resultados de remoción de hierro y manganeso 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= 1.6389 seg., para una cascada de 5 escalones y un tiempo de caída por escalón = 0.27 seg., y una altura por escalón = 0.355 m, a una velocidad de 0.0048559 m/s.

## RECOMENDACIONES

**Consideraciones generales para utilizar este proceso:**

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.

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

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 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 Mm 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.

Debido a que los rendimientos para este sistema no son favorables, se recomienda 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 co Fe y Mn a la arcilla.

## BIBLIOGRAFIA

- BARRENECHEA A. 1996. Manual de la Cepis.  
Aspectos Físicoquímicos de la calidad del agua.  
Capítulo 1 Pág. 33 -34
- JAIRO R. 1999. FE Y MN. 2da. Edición Editorial  
Alfa & Omega . México Pág. 20
- JEMMER F. MCCALLION J. 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
- OMS. 1995. Guías para la calidad del agua  
potable segunda edición volumen 1 organización  
mundial para la salud. Pág. 31
- OPS. 1987. Guía para la calidad del agua  
potable Volumen 2 . Pagina 288.
- LIGIA CÁNEPA DE CARGAS.1992. Manual 1.  
Teoría y evaluación. Cepis. Pág. 59.
- NORMA GUATEMALTECA, OBLIGATORIA.  
Agua para consumo humano. 29 001:99
- PÉREZ CARRIÓN, J.1992. Manual 1 de la  
Cepis, El agua – Calidad y Tratamiento para  
consumo humano. Pág. 43-44
- SAWEY C.. / MCCARTY, P. 1967. Chemistry  
for sanitary Engineers. McGraw Hill Book  
Company. Second Edition. Kogakusha  
company. LTd Tokio
- SAWYER C. & MC CARTY G. 2001 Química  
para ingeniería ambiental Cuarta edición.  
Capítulo 26 Pág. 624-630. Editorial McGraw-  
Hill.. Cuarta Edición. Colombia
- VARGAS L.1986. Manual de la Cepis.  
Proceso unitario y plantas de tratamiento.Cap.3  
Pág. 108