

ORIGEN Y RIESGOS HIDRÁULICOS
POR LAS CONCENTRACIONES
DE Fe Y Mn EN EL AGUA
QUE SE DISTRIBUYE EN EL
FRACCIONAMIENTO JARDINES DEL
GRIJALVA, EN EL MUNICIPIO DE
CHIAPA DE CORZO, CHIAPAS

ORIGIN AND HYDRAULIC RISKS CAUSED BY THE
CONCENTRATIONS OF Fe AND Mn IN THE RESIDENCIAL
AREA OF JARDINES DEL GRIJALVA IN THE MUNICIPALITY OF
CHIAPA DE CORZO, CHIAPAS

—
Martín D. Mundo Molina
ic_ingenieros@yahoo.com.mx

José Luis Pérez Díaz
nizado2@gmail.com

CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA,
CUERPO ACADÉMICO: CIENCIA E INGENIERÍA,
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS, MÉXICO



Para citar este artículo:

Mundo M. Martín, Pérez J. (2020). Origen y riesgos hidráulicos por las concentraciones de Fe y Mn en el agua que se distribuye en el fraccionamiento Jardines del Grijalva, en el municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*. IX(23), 99-125. doi: <http://dx.doi.org/10.31644/IMASD.23.2020.a07>

RESUMEN

En esta investigación se enuncia el origen y las razones de la presencia de Fe y Mn en el agua del fraccionamiento Jardines del Grijalva en el municipio de Chiapa de Corzo, el cual se localiza en la margen izquierda del río Grijalva, a 1600 metros aguas arriba de la planta potabilizadora *Ciudad del Agua* en su límite norte y adjunto a la “Planta La Mosca” en su límite oriental. Se describen las concentraciones de estos minerales detectados en diversas pruebas realizadas en los cuerpos de agua que abastecen al citado fraccionamiento, los inconvenientes y problemas hidráulicos que éstos generan en la red de distribución interna de las viviendas.

Palabras clave

Concentración de Fe y Mn; riesgos hidráulicos y de salud humana; reducción del diámetro de las tuberías.

— *Abstract* —

This investigation states the origin and reasons for the presence of Fe and Mn in the drinking water of the Jardines del Grijalva in the municipality of Chiapa de Corzo, which is located on the left edge of the Grijalva River, 1600 meters upstream from the “Ciudad del Agua” water treatment plant in its northern limit and attached to the "Planta la Mosca" in its eastern limit. The concentrations of these minerals detected in various tests performed on the bodies of water that supply the said fractionation are described. On the other hand, the inconveniences and hydraulic problems that these generate in the internal distribution network of the homes are determined.

Keywords

Concentration of Fe and Mn; hydraulic and human health risks; reduction of pipeline diameter.

En México, los desarrolladores de unidades y fraccionamientos habitacionales tienen la obligación de suministrar a los usuarios los servicios públicos que la ley ordena, esto incluye el suministro de agua potable (AP). Por tal razón, se deben buscar las fuentes más cercanas que garanticen la dotación de AP en un horizonte temporal determinado, que satisfaga las necesidades de la totalidad de la población proyectada en dicho horizonte. Las fuentes de agua son siempre distintas y dependen de las redes hidrológicas superficiales y subterráneas de la zona donde se ubica el proyecto habitacional. Las fuentes de suministro pueden ser: arroyos, ríos, pozos, lagos, lagunas y vasos de almacenamiento de presas. Así, en el año 2006 se inició la construcción del fraccionamiento Jardines del Grijalva (FIG) en el municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas. Éste se ubica en la margen izquierda del Río Grijalva (a un costado de la antigua “Planta La Mosca”, ver foto 1). Como se sabe, el Río Grijalva (RG) es el segundo más caudaloso del país por lo que el caudal de suministro para el FIG está garantizado. El proyecto del FIG consistió en construir 3618 viviendas para atender la demanda de los sectores de población de nivel medio emergente y nivel medio típico en los municipios de Tuxtla Gutiérrez y Chiapa de Corzo (fotos 1 y 2).



Foto 1. Fraccionamiento Jardines del Grijalva. Fuente: Google Earth, 2019



Foto 2. Área habitacional del FJG con edificaciones de dos plantas

Sin embargo, a pesar de la cercanía del RG y la suficiencia de agua para la dotación al FJG, en la época de lluvias es necesario contar con otra alternativa para el suministro de agua, ya que por cuestiones naturales y los procesos de deforestación que la cuenca del RG sufre desde hace varias décadas, arrastra demasiados azolves. Los azolves se transportan en tal cantidad, que en muchas ocasiones ha sido necesario detener el bombeo de las aguas del RG a la planta potabilizadora *Ciudad del Agua*, obra hidráulica que abastece a la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, ubicada a 1600 metros aguas abajo de la obra de toma del FJG (foto 3).



Foto 3. Fraccionamiento Jardines del Grijalva y Ciudad del Agua. Fuente: Google Earth, 2019

Por esa razón se construyeron en el FJG cuatro "pozos artesianos", dos cárcamos y un tanque sedimentador para operarlos en la época de lluvias,

por la imposibilidad de suministrar agua al FJG con una toma directa del río en dicha época. En la actualidad y desde su construcción el agua que dicho fraccionamiento recibe es únicamente de los pozos, ya que el sedimentador arriba enunciado (ver letra C de la figura 1), carece del equipo respectivo para su adecuada operación (bombas y accesorios hidráulicos). En la figura 1 se puede ver la distribución de los pozos, canal de llamada, tanque sedimentador y planta de tratamiento del FJG.



Figura 1. Pozos, cárcamos de bombeo y tanque sedimentador del FJG

- A Río Grijalva.
- B Canal de llamada junto al río (es parte del proyecto del tanque sedimentador).
- C Tanque sedimentador concluido (falta colocar los equipos electromecánicos).
- D Cárcamo de bombeo (no está funcionando).
- E Pozo 4: $Q = 15.60$ l/s y un bombeo diario de 24 horas.
- F Pozo 3: $Q = 16$ l/s.
- G Línea de conducción desde A hasta J (aproximadamente 350 m).
- H Pozo 2 (cancelado por la CONAGUA)
- I Planta de tratamiento.
- J Pozo 1: $Q = 10$ l/s y un bombeo diario de 24 horas.

En varios de los pozos mostrados en la figura 1 se ha detectado la presencia de Hierro (Fe) y Manganeso (Mn). Hace algunos años la operación del pozo 2 fue cancelado por la Comisión Nacional del Agua, por su alto contenido de Fe y Mn.

2. ORIGEN DEL FE Y MN EN EL FJG

La división morfológica de Chiapas está compuesta por ocho provincias (ver figura 2): La Llanura del Golfo, Las Montañas del Norte, Las Montañas del Oriente, Las Tierras Bajas, La Meseta Central, La Depresión Central (DC), El Macizo de Chiapas (Sierra Madre de Chiapas) y la Planicie del Pacífico (Castro, 1999). La zona de estudio se ubica en la DC, es decir entre la Sierra Madre de Chiapas (SMC) y la Meseta Central (MC).

La SMC es una cadena montañosa paralela al Océano Pacífico que va desde Oaxaca hasta la República de Guatemala, es de origen ígneo/metamórfico

con una orientación preferencial NW 60° y una altitud promedio de 3000 msnm (su mayor altura corresponde al volcán Tacaná con 4060 msnm). La SMC es el parteaguas de las dos vertientes del estado: la del Pacífico y la del Golfo. Tiene una longitud de 250 km y un ancho que varía de 50 km al noroeste hasta 65 km al sureste. La MC tiene una longitud de 244 km, se encuentra contigua a la DC y tiene un ancho máximo de 50 km (su anchura mínima es de 5 km). Hacia el sureste tiene una altitud entre 500 y 560 msnm. Sus alturas máximas son el volcán Tzontehuitz y el Huitepec con 3050 msnm y 2660 msnm respectivamente. Ambos volcanes son manifestaciones aisladas andesíticas-basálticas emplazadas en calizas-dolomías cerca de San Cristóbal de las Casas. Esta provincia está constituida principalmente por lutitas, limolitas y areniscas del Cretácico, así como por rocas volcánicas cenozoicas representadas por lavas y tobas de composición andesítico-basáltica. La DC es una faja de terreno plano con una orientación NW-SE paralela a la SMC y a la MC, por la cual discurre el RG (cuyo origen son los Altos Cuchumatanes de Guatemala). La DC atraviesa el estado de Chiapas, tiene una longitud de 255 km (48 km de ancho al sureste y 16 km de ancho al noroeste), inicia en el SE en el límite con Guatemala y termina en el límite noroccidental con Oaxaca. Se trata de un sinclinorio donde afloran rocas cretácicas y cenozoicas, cuya altitud varía entre los 500 y 700 msnm. En esta zona se encuentran suelos delgados constituidos por de carbonato de calcio, arcillas y arena (Castro, 1999).



Figura 2. Morfología del estado de Chiapas. Fuente: Ruíz, 2014

El río más importante de la DC es el RG, y se suman a su red hidrológica al menos ocho ríos relevantes que escurren desde la vertiente del Golfo de la SMC hacia el RG. Desde el extremo noroeste de la SMC (alrededor de Cintalapa y Jiquipilas) drenan los ríos La Venta y Estoracon, que se dirigen al

norte, cruzan las montañas y descargan por el lado sur de la presa Malpaso. De sur a norte los principales ríos tributarios de la SMC que discurren hacia el vaso de la presa la Angostura son: San Miguel, Jaltenango, Custepec (o Cuxtepeque) y El Dorado (Plascencia *et al.*, 2014). Aguas abajo de la presa la Angostura se suman dos ríos importantes, Suchiapa y Santo Domingo (el primero es afluente del segundo), atraviesan las mesetas bajas del municipio de Suchiapa y Chiapa de Corzo hasta desembocar en el RG. Esta red hidrológica primaria de la DC acarrea diversos tipos de minerales, algunos de ellos se diluyen en los caudales mínimos de estos ríos, incluso durante la época de estiaje. A pesar de que los caudales son mínimos durante la época de estiaje no son despreciables, por ejemplo, Mundo *et al.*, (2019a) reportó un caudal mínimo de 4656.65 l/s del río Suchiapa medido en el mes de febrero de 2019. Así, algunos minerales disueltos en este caudal, si fuese el caso son muy difícil detectar y bajo ciertas circunstancias no rebasan la norma NOM-127-SSA (DOF, 1999). Conviene destacar que el caudal reportado del río Suchiapa en la época de estiaje es mayor que el gasto de varios ríos importantes del norte del país como: el río Tijuana de la Región Hidrológica (RH) de Baja California (3012.43 l/s), el río Concepción (3583.20 l/s), el río Mátape (2822.17 l/s) y el río Sonoyta (634.20 l/s), los tres últimos de la RH noroeste.

Así, desde el punto de vista geodinámico, tanto la *red hidrológica primaria* antes descrita como la *red hidrológica secundaria* de drenaje superficial y subterráneo (perenne y no perenne) de la vertiente del Golfo, entre la SMC y el MC, han formado los valles fluviales de la DC mediante los mecanismos de arrastre y deposición. Por otra parte, los flujos torrenciales de la red secundaria que se forman en la época de lluvia, transportan también una gran cantidad de minerales hacia los valles fluviales. Estas corrientes convergen al RG transformando el régimen supercrítico de los flujos de montaña en régimen subcrítico en las pendientes bajas de las planicies de la DC donde la energía cinemática de la corriente es baja (carga de velocidad en las ecuaciones 2 y 3), razón por la cual se constituyen en zonas de deposición, debido a las bajas pendientes (ver ecuación 3). Se suma a lo anterior el efecto no natural de flujo retardado (remanso) que produce la cortina de la Presa Chicoasén, generando un perfil hidráulico de flujos gradualmente variado tipo M1. Bajo estas condiciones: cambios de pendiente de montaña a planicie, la carga de velocidad del flujo mostrada en las ecuaciones 2 y 3, transforman la relación de energías mostrada en la ecuación 1, por efecto de la pendiente (S_0) como se observa en la ecuación 3 (Sotelo, 1997):

$$E_1 = E_2 \quad (1)$$

$$E = z + y + \frac{v^2}{2g} + \sum h_t \quad (2)$$

$$\frac{v^2}{2g} = \frac{1}{n} \frac{R h^{\frac{4}{3}}}{2g} S_o \quad (3)$$

Donde, E_1 es la energía del flujo en la zona de montaña (altas pendientes), E_2 es la energía del flujo en la zona de planicie (bajas pendientes), z es la referencia topográfica, v es la velocidad promedio del río en m/s, “ y ” es el tirante promedio de la corriente, $\sum h_t$ son las pérdidas totales, g es la aceleración de la gravedad terrestre, Rh es el radio hidráulico del cauce y S_o es la pendiente del río.

La justificación hidráulica de la deposición generada por la mecánica de las corrientes superficiales y subsuperficiales de la DC en sus valles fluviales, son los valores bajos de F (ecuación 4), debido al cambio de régimen hidráulico, es decir de flujos supercríticos a flujos subcríticos (cambios de pendiente, de montaña a planicie), por esa razón, la energía cinemática representada por la velocidad del flujo (v), partida por la energía potencial (la raíz del producto de la aceleración gravitacional y el tirante hidráulico del agua) tiende a ser menor que la unidad (Chow, 1994):

$$F = \frac{v}{\sqrt{gy}} \quad (4)$$

Bajo las condiciones hidráulicas descritas, los minerales transportados se depositan no solamente en las zonas de los valles fluviales de muy baja velocidad, sino también en las zonas de recirculación o en los meandros (foto 4), donde si además los valores de F son muy bajos, entonces se convierten en áreas de deposición de azolves con diversos contenidos de minerales, como es el caso de muchos tramos del RG en la zona de influencia del FJG bajo estudio.



Foto 4. Meandros del río Grijalva aguas arriba de Acala, Chiapas

El FJG mostrado en la foto 3 se localiza en la DC, entre la SMC y la MC, a 408 msnm en las siguientes coordenadas geográficas: 160 43' 48'' N y 930 02' 01'' O, en una zona geológica clasificada como una secuencia de caliza, lutita y conglomerados con horizontes de caliza de la Formación Soyaló (Castro, 1999). En algunos puntos de ese tramo, especialmente frente al FJG, justo en la obra de toma, se tomaron muestras para detectar la presencia de Fe y Mn con resultados positivos en la primera campaña. Por lo tanto, se asume que al menos durante la toma de una de las "muestras", el transporte fluvial de sedimentos y la deposición en las zonas de baja velocidad del RG, fue el origen de la presencia de Fe y Mn en la obra de toma del tanque sedimentador del FJG mostrado en la figura 1 (ver tabla 2a).

Así, una probable fuente de la presencia de Fe y Mn en el FJG es el acarreo de estos elementos desde los nódulos que contienen estos elementos en las montañas de donde procede el RG o las montañas que limitan con el valle de la DC en ambas márgenes del RG (ver figura 2). La vertiente del MC son macizos con abundante caliza y áreas de karst, es decir una forma de relieve originado por meteorización química de determinadas rocas, como la caliza, dolomía, aljez, compuestas por minerales solubles en H₂O, que forman oquedades que transportan agua. Dicho transporte, basado en diversas redes hidráulicas en forma de canales subsuperficiales o canales intersticiales (construidos por el agua a través de la roca caliza), pueden atravesar nódulos con contenidos de Fe y Mn, produciéndose micro-acarreos permanentes o temporales, y en su deposición final o durante su transporte contaminan el agua, especialmente de pozos (de forma transitoria o permanente). Son permanentes si las zonas de deposición final son pozos donde se acumula el agua contaminada (o si los nódulos subyacen in situ de forma natural, en el fondo del pozo).

La abundancia en la corteza terrestre de Fe y Mn y su distribución aleatoria (desde la formación de la Tierra), así como los flujos superficiales y subterráneos que remueven los nódulos minerales (por la disolución de las rocas), son arrastrados y depositados en acuíferos o pozos artesianos, independientemente de que pueden localizarse como nódulos subyacentes justo donde se construyen los pozos. Este es el origen de la presencia de Fe y Mn encontrado en algunos pozos del FJG.

El que algunas fuentes de agua tengan altas concentraciones de Fe y Mn no es novedoso, Esteller *et al.*, (2000), Guzmán *et al.*, (2011) y Hernández *et al.*, (2017) demostraron que este problema se evidencia en muchos cuerpos de agua de la República Mexicana. Cientos de fuentes de abastecimiento de agua del país contienen Fe y Mn en concentraciones que exceden la Norma Oficial Mexicana para consumo humano NOM- 127-SSA (DOF, 1999).

Fierro. El hierro o fierro (en muchos países hispanohablantes se prefiere esta segunda forma) es un elemento químico con número atómico 26, situado en el grupo 8, periodo 4 de la tabla de elementos. Su símbolo es Fe (del latín *ferrum*) y su masa atómica es 55.6 u. Este metal de transición es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre y representa el 5% de los metales. Como se sabe, el núcleo de la Tierra está formado principalmente por hierro y níquel cuyo movimiento genera un campo magnético. El Fe es un metal duro, pesado pero maleable, de color gris plateado y presenta propiedades magnéticas. Se encuentra en la naturaleza formando parte de numerosos minerales, entre ellos muchos óxidos y raramente se encuentra libre. Para obtener hierro en estado elemental, los óxidos se reducen con carbono y luego es sometido a un proceso de refinado para eliminar las impurezas presentes (Mundo *et al.*, 2019b).

En el caso del FIG se ha detectado la presencia de Fe en algunos pozos mostrados en la figura 1. Una vez que se extrae el agua de dichos pozos y se pone en contacto con el oxígeno, ésta se oxida formando precipitados de hidróxido de hierro. Si el agua se emplea directamente, sin ningún tratamiento previo, la precipitación de Fe ocurre en circunstancias indeseables que hacen objetable al líquido vital. Por ejemplo, si el agua se emplea en uso doméstico, al estar en contacto con el aire y con otros oxidantes, por ejemplo, cloro, entonces se precipita. Dicho precipitado se adhiere a la superficie de las partes cromadas de los muebles sanitarios, como llaves y accesorios de cocina y/o baño, dejando las piezas cubiertas con un desagradable tinte negro azulado. Por otra parte, cuando se lava la ropa, además de detergentes se agregan otros aditivos para mejorar la calidad del lavado, entre los que casi siempre se encuentra algún compuesto clorado, éste precipita el Fe y se deposita sobre las fibras textiles de la ropa, la cual se mancha con un tinte azul oscuro, semejante al que queda cuando la ropa se lava junto con prendas de mezclilla decoloradas (Mundo *et al.*, 2019b).

Manganeso. El manganeso es un elemento químico con número atómico 25, situado en el grupo 7 de la tabla periódica de los elementos cuyo símbolo es Mn y su masa atómica es 54.93 u. El manganeso es un metal de transición normalmente de color blanco grisáceo, de textura dura pero muy frágil, refractario y fácilmente oxidable. Se encuentra como elemento libre en la naturaleza y a menudo en combinación con el hierro u otros minerales. Como elemento libre el Mn es un metal que puede tener aleaciones con algunos metales industriales para producir, por ejemplo, aceros inoxidables. Está ampliamente distribuido en la corteza terrestre y es el duodécimo elemento más abundante en la Tierra. Se encuentra en cientos de minerales, aunque sólo una docena tiene interés industrial. Destacan: la pirolusita (MnO_2), la psilomelana ($MnO_2 \cdot H_2O$), la manganita ($MnO(OH)$), la braunita ($3Mn_2O_3 \cdot MnSiO_3$), la rodonita ($MnSiO_3$), la rodocrosita ($MnCO_3$), y la hüb-

nerita ($MnWO_4$). 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 Mn presenta estado de oxidación 7+ son agentes oxidantes muy energéticos. Independientemente de sus estados de oxidación, cuando el agua de un pozo yace sobre este mineral se contamina, ya que el Mn se diluye al contacto con el agua. El Fe y el Mn pueden estar disueltos en el agua, pero una vez que ésta es extraída del pozo o de la fuente de origen y se pone en contacto con el oxígeno, ambos se oxidan y forman precipitados de hidróxido de hierro y de manganeso; esto ocurre también cuando se mezcla con el cloro (Mundo *et al.*, 2019b).

Presencia de Fe y Mn en el agua que se distribuye en el FJG

El pozo 2 (letra H) de la figura 1 fue cancelado por las altas concentraciones de Fe y Mn. De los pozos y cárcamos restantes en operación, cuatro de ellos: 3(F), 4(E), 5(D) y 6(B) se encontraron diversas concentraciones de Fe y Mn en dos campañas de medición, cuyos resultados pueden verse en las tablas 1, 2a y 2b. Sólo en el pozo 1 (J) no se detectó la presencia de estos minerales en las dos campañas de medición realizadas. Algunos exceden la norma NOM-127-SSA como se puede ver en la tabla 2a y 2b, ya que el máximo permisible para el Fe es 0.30 mg/l y para el Mn es 0.15 mg/l.

Tabla 1
Campaña 1, Fe y Mn en los pozos, cárcamo y RG

Toma de la muestra	Fierro total (mg/l)	Manganeso total (mg/l)
Borde del río (A)	1.30	0.154
Pozo 1 (J)	0.10	0.006
Pozo 2 (H)	Cancelado	Cancelado
Pozo 3 (F)	0.16	0.186
Pozo 4 (E)	0.220	1.274
Cárcamo 5 (D)	0.680	0.100
Canal de llamada 6 (B)	0.360	0.934

Fuente: Mundo *et al.*, 2019b

Tabla 2a
Comparación contra la norma NOM- 127-SSA

Ubicación	Fe total (mg/l)	Mn total (mg/l)	% de Fe en exceso	% de Mn en exceso
Borde del río (A)	1.30	0.154	77	2.59
1 (J)	0.10	0.006	0	0
2 (H)	Cancelado	Cancelado	Cancelado	Cancelado
3 (F)	0.16	0.186	0	19.35
4 (E)	0.220	1.274	0	88.22
5 Cárcamo (D)	0.680	0.100	55.88	0
6 Canal de llamada (B)	0.360	0.934	16.66	83.94

Fuente: Mundo *et al.*, 2019b

En la tabla 2a se pueden observar los pozos que exceden los límites permisibles de la norma NOM- 127-SSA y en las columnas 4 y 5 los porcentajes de excedencia. Como se puede apreciar solo el pozo 1 (identificado en la figura 1 como J) no excede la norma de Fe y Mn.

Tabla 2b
Campaña 2, Fe y Mn en los pozos, cárcamos y RG

Ubicación	Fierro total (mg/l)	Manganeso total (mg/l)	% de Fe en exceso	% de Mn en exceso
Borde del río (A)	0.10	0.03		
1 (J)	No se realizó	No se realizó		
2 (H)	Cancelado	Cancelado	Cancelado	Cancelado
3 (F)	0.03	1.12		86.60
4 (E)	0.07	1.07		85.98
5 Cárcamo (D)	0.09	1.99		92.46
6 Canal de llamada (B)	0.38	0.91	21.05	83.51

Fuente: Mundo *et al.*, 2019b

En la tabla 2b se pueden observar los pozos que exceden los límites permisibles de la norma NOM- 127-SSA y en las columnas 4 y 5 los porcentajes de excedencia. Como puede apreciarse, en la segunda campaña realizada, el agua en el borde del río cumple con los parámetros de la norma NOM- 127-SSA, sólo el pozo 6 está fuera de dicha norma. Por lo que se refiere al Mn, todos los pozos estudiados están por encima de los límites permisibles de la citada norma.

Concentraciones permisibles

Las concentraciones permisibles de Fe y Mn en el agua potable están enunciadas en la "Norma Modificada NOM - 127-SSA-1994" publicada el 20 de octubre de 2000, por el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario. Esta norma modificada, reglamenta los límites permisibles de diversos minerales y sustancias en el agua potable para uso y consumo humano, en otras palabras, establece los *límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. La vigilancia del cumplimiento de esta Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría de Salud en coordinación con los gobiernos estatales, municipales, la CDMX, las Comisiones Estatales de Agua y Saneamiento y la Comisión Nacional del Agua, en sus respectivos ámbitos de competencia, para efecto de cumplir la ley, aplicable a todos los sistemas de abastecimiento públicos y privados y a cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional.

En la tabla 3 se muestran los límites de color, olor, sabor y turbiedad del agua potable en México de acuerdo a la NOM-127-SSA-1994 modificada.

Tabla 3
Límites de color, olor, sabor y turbiedad del agua potable en México

Característica	Límite permisible
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

Fuente: Mundo *et al.*, 2019b

En la tabla 4 se muestran los límites de Fe y Mn según la NOM-127-SSA-1994 modificada.

Tabla 4
Límites de Fe y M

Característica	Límite permisible (mg/l)
Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Bario	0.70
Cadmio	0.005
Cianuros	0.07
Cloro residual libre	0.2-1.50
Cloruros	250.00
Cobre	2.00
Manganeso	0.15
Fierro	0.30

Fuente: DOF, 1999

Los riesgos que sobre la salud humana podrían tener el Fe y Mn en los habitantes del FJG se pueden ver en Mundo *et al.*, (2019b).

3. PROBLEMAS HIDRÁULICOS

Reducción del diámetro de las tuberías

El Fe y Mn se oxidan al reaccionar con el cloro y se precipitan e incrustan en las tuberías de conducción y redes de distribución de agua potable, disminuyendo el diámetro de las mismas, especialmente en las tuberías de fierro fundido (FoFo), como se observa en la figura 2. No existen estudios que determinen con precisión el porcentaje de disminución del diámetro de las tuberías, porque esta circunstancia obedece a muchas variables y condiciones *in situ*; lo que sí se evidencia es que la disminución del diámetro provoca cambios en la presión, velocidad del agua y pérdidas de energía (E) en la red de distribución (ver ecuación 5), que se manifiestan como “pérdidas de carga hidráulica”, al desequilibrarse E en la red por las incrustaciones de Fe, Mn o acumulación de sarro:

$$E = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + \sum h_t \quad (5)$$

En términos de caudal, la ecuación (5) se puede escribir como;

$$E = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{Q^2}{2gA^2} + \sum h_t \quad (6)$$



Figura 2. Reducción del diámetro de la tubería. Fuente: Valencia, 2011

Estos cambios de presión y velocidad (generado por las incrustaciones de Fe y Mn), afectan al sistema de distribución de agua del FJG, especialmente en la red interna de tuberías de las casas habitación, reduciendo el caudal y la presión necesaria en la disposición final del agua. A pesar de que las concentraciones de Fe y Mn en el FJG son “bajas”, están provocando desde el año 2006 a la fecha, incrustaciones en las tuberías del sistema de abastecimiento.

En la literatura especializada se han reportado casos de reducción del diámetro de las tuberías de hasta 70% asociados con el Fe (Petkova, 1994), por lo tanto, en los siguientes subíndices se simularán hidráulicamente las pérdidas de carga para diferentes porcentajes de reducción del diámetro de una tubería de FoFo de ½ pulgada de diámetro. La tubería de FoFo de ½ pulgada de diámetro es muy utilizada en las instalaciones hidráulicas que conducen agua desde el tanque de almacenamiento (instalado en el techo) a la regadera del baño, al wc y al grifo del lavabo.

Variaciones de “f” para distintos diámetros reducidos de FoFo, para una tubería de ½ pulgada de diámetro

La figura 3 representa un corte transversal de una casa de dos plantas del FJG. En esta figura se observa un depósito de agua sobre el techo y la tubería de FoFo de ½ pulgada de diámetro, que conduce agua desde dicho depósito hasta la regadera de la planta baja y el grifo (llave del lavabo de la cocina). La carga hidráulica desde el depósito hasta la regadera es de 5.25 mca y de 6.50 mca hasta la llave del lavabo.

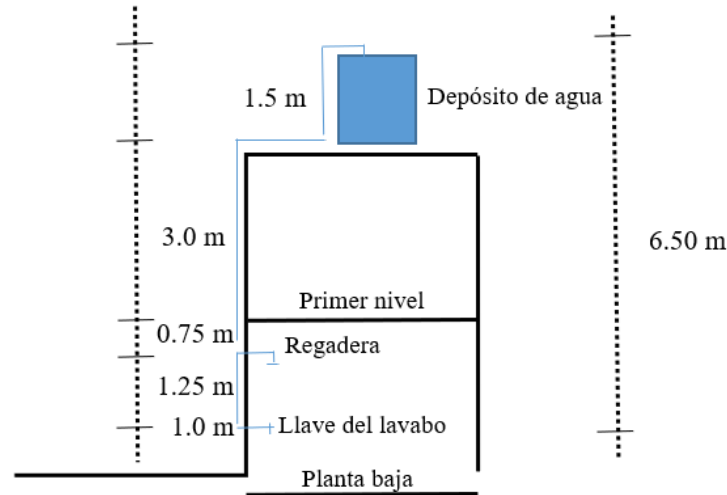


Figura 3. Corte transversal: tinaco, regadera y cocina del FJG

Cuando la tubería es nueva, ésta funciona con las cargas hidráulicas originales estimadas en el diseño, sin embargo, con el paso del tiempo van cambiando, no solo la rugosidad sino también el diámetro interno de la red, debido a las incrustaciones de Fe, Mn y sarro, respectivamente. Cuando el Fe y Mn están acompañados de alta alcalinidad y dureza del agua (caso muy común en México), el diámetro de las tuberías se reducen más, debido a las fuertes incrustaciones carbónicas (sarro). El sarro es producto de las incrustaciones de calcio y magnesio sedimentado, que comienza a acumularse cuando el agua dura empieza a circular a través de la red de tuberías. El calcio sin tratamiento se cristaliza, convirtiéndose en una estructura adherente. Estas incrustaciones de cal se desarrollan aún más cuando la presión hidráulica es altamente variable. Así, el sarro, el Fe y el Mn reducen de forma relevante los diámetros de las tuberías con el paso del tiempo.

A modo de ejemplo, en la figura 4 se puede observar una tubería con una reducción casi total de su diámetro interior por incrustaciones de sarro (Hidroquil, 2019); es evidente que el caudal se reduce de forma relevante y las pérdidas de carga hidráulica (h_f), son más severas cuanto más reducido es el diámetro de las tuberías.



Figura 4. Incrustaciones de sarro. Fuente: Hidroquil, 2019

En la literatura especializada existen distintas ecuaciones para estimar las pérdidas hidráulicas de carga, las más relevantes son la de Manning, Hazen-Williams y Darcy-Weisbach. En ausencia de datos y de certeza sobre la magnitud de las reducciones del diámetro de las tuberías por sarro, Fe y/o Mn en cada casa del FIG, en esta investigación se realizarán simulaciones hidráulicas de las diversas pérdidas (h_f) para distintos porcentajes de diámetros en procesos de reducción, con el fin de mostrar la relevancia de estas pérdidas. Así, dos de las ecuaciones más importantes para estimar h_f son, las de Darcy-Weisbach (Anaya *et al.*, 2014):

$$h_f = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad (7)$$

Donde, f es el factor de fricción de Darcy, L es la longitud de la tubería, D es el diámetro, v es la velocidad del agua y g es la constante de gravedad terrestre. El valor de f se puede calcular con la ecuación de Von Kármán (Flores *et al.*, 2005):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \quad (8)$$

Y la ecuación de Colebrook (Anaya *et al.*, 2014):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{K}{3.71 D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (9)$$

La variable Re es el número de Reynolds y K/D es la rugosidad relativa de la tubería.

Sin embargo, para facilitar los cálculos y asumiendo una ligera diferencia no relevante en las estimaciones de “ f ” (desde el punto de vista práctico),

se usará la ecuación de Hazen-Williams para tuberías de fundición y acero (Flores *et al.*, 2005):

$$f = \frac{(13.69)(g)}{(C^{1.85})(v^{1.15})(D^{1.17})} \quad (10)$$

En la columna 2 de la tabla 6 se pueden ver los resultados de las variaciones de “f” para 10 reducciones de diámetro de la tubería de FoFo de ½ pulgada de diámetro; en dicha tabla se puede apreciar que la variación de “f” es de casi 2 % si se reduce un 10% el diámetro de la tubería, pero es mayor al 11% cuando se reduce el 50%.

Tabla 6
Estimaciones del factor de fricción de Darcy

%	f	% diferencia
0	0.0604	0.00
5	0.0609	0.87
10	0.0615	1.78
15	0.0621	2.73
20	0.0627	3.72
25	0.0634	4.77
30	0.0642	5.88
35	0.0650	7.06
40	0.0659	8.32
45	0.0668	9.66
50	0.0679	11.12

En la figura 6 se pueden ver las variaciones exponenciales del factor de fricción “f”, desde cero a una reducción del diámetro del 50%.

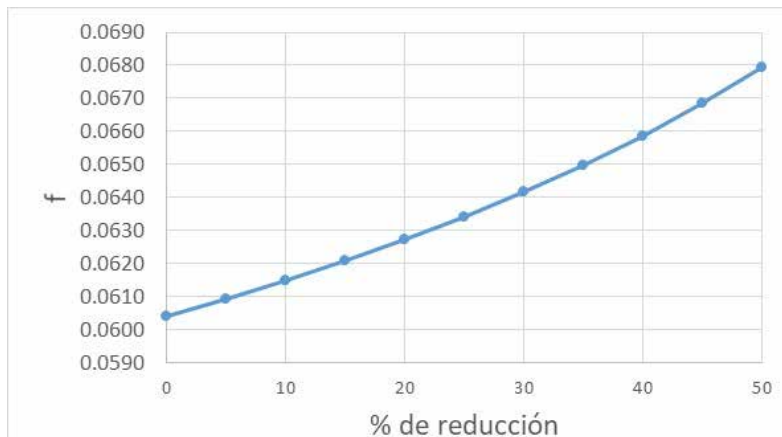


Figura 6. Variación de “f” vs reducción de diámetro

Simulación de pérdidas de carga para diferentes diámetros reducidos

El factor f de Darcy o de Hazem-Williams afecta de forma directa a hf, como se puede observar en la ecuación 7; así, una vez obtenido “f” se estimaron las “pérdidas de carga” para las diferentes reducciones de área hidráulica de la tubería de FoFo de ½ pulgada de diámetro, desde cero hasta el 50%.

En la tabla 7 se muestran las diversas estimaciones de hf calculadas desde el depósito de agua hasta el lavabo de la cocina (ver figura 3), suponiendo distintos escenarios de reducción de área hidráulica por sarro, Fe y/o Mn. Las pérdidas de carga hidráulica (hf) estimadas para las variadas alturas con reducciones que van desde el 0% hasta el 50%, se muestran en las columnas 2 a la 12.

Tabla 7
Pérdidas de carga para diversas alturas, desde el depósito hasta el lavabo

H (m)	D (0%)	D(5%)	D (10%)	D(15%)	D(20%)	D(25%)	D(30%)	D(35%)	D(40%)	D(45%)	D(50%)
0.00	0.0125 m	0.0119	0.0113	0.0106	0.0100	0.0094	0.0088	0.0081	0.0075	0.0069	0.0063
0.25	0.2042	0.2027	0.2009	0.1990	0.1967	0.1942	0.1912	0.1878	0.1837	0.1788	0.1729
0.50	0.4291	0.4261	0.4226	0.4187	0.4142	0.4091	0.4032	0.3963	0.3882	0.3784	0.3665
0.75	0.6541	0.6494	0.6442	0.6384	0.6317	0.6240	0.6152	0.6048	0.5926	0.5780	0.5601
1.00	0.8790	0.8728	0.8659	0.8581	0.8491	0.8389	0.8271	0.8134	0.7971	0.7776	0.7538
1.25	1.1040	1.0962	1.0876	1.0778	1.0666	1.0539	1.0391	1.0219	1.0015	0.9771	0.9474
1.50	1.3289	1.3196	1.3092	1.2975	1.2841	1.2688	1.2511	1.2304	1.2060	1.1767	1.1410
1.75	1.5539	1.5430	1.5309	1.5172	1.5016	1.4837	1.4631	1.4390	1.4105	1.3763	1.3347
2.00	1.7788	1.7664	1.7525	1.7369	1.7190	1.6986	1.6750	1.6475	1.6149	1.5759	1.5283
2.25	2.0038	1.9898	1.9742	1.9566	1.9365	1.9136	1.8870	1.8560	1.8194	1.7755	1.7219
2.50	2.2287	2.2132	2.1959	2.1763	2.1540	2.1285	2.0990	2.0645	2.0238	1.9750	1.9155
2.75	2.4537	2.4366	2.4175	2.3960	2.3715	2.3434	2.3110	2.2731	2.2283	2.1746	2.1092
3.00	2.6786	2.6600	2.6392	2.6157	2.5889	2.5583	2.5229	2.4816	2.4328	2.3742	2.3028
3.25	2.9036	2.8834	2.8608	2.8354	2.8064	2.7732	2.7349	2.6901	2.6372	2.5738	2.4964
3.50	3.1285	3.1068	3.0825	3.0551	3.0239	2.9882	2.9469	2.8987	2.8417	2.7733	2.6901
3.75	3.3535	3.3302	3.3042	3.2748	3.2414	3.2031	3.1589	3.1072	3.0461	2.9729	2.8837
4.00	3.5784	3.5536	3.5258	3.4945	3.4588	3.4180	3.3708	3.3157	3.2506	3.1725	3.0773
4.25	3.8034	3.7770	3.7475	3.7142	3.6763	3.6329	3.5828	3.5243	3.4550	3.3721	3.2710
4.50	4.0283	4.0004	3.9692	3.9339	3.8938	3.8479	3.7948	3.7328	3.6595	3.5717	3.4666
4.75	4.2533	4.2238	4.1908	4.1536	4.1113	4.0628	4.0068	3.9413	3.8640	3.7712	3.6582
5.00	4.4782	4.4472	4.4125	4.3733	4.3287	4.2777	4.2187	4.1498	4.0684	3.9708	3.8518
5.25	4.7032	4.6706	4.6341	4.5930	4.5462	4.4926	4.4307	4.3584	4.2729	4.1704	4.0455
5.50	4.9281	4.8940	4.8558	4.8127	4.7637	4.7076	4.6427	4.5669	4.4773	4.3700	4.2391
5.75	5.1531	5.1174	5.0775	5.0324	4.9812	4.9225	4.8547	4.7754	4.6818	4.5695	4.4327
6.00	5.3780	5.3408	5.2991	5.2521	5.1986	5.1374	5.0666	4.9840	4.8863	4.7691	4.6264

En las figuras 7 y 8 se pueden observar las pérdidas de carga desde el depósito de la figura 3 hasta la regadera y el lavabo, respectivamente, para diferentes reducciones de sección hidráulica, desde 0 hasta el 50%, ambas pérdidas tienen una tendencia exponencial conforme se reduce el diámetro.

Así, desde el depósito hasta la regadera hay una pérdida de 0.689 m cuando la sección hidráulica se reduce un 50% (figura 7) y de 0.8456 m entre el depósito y el lavabo para el mismo porcentaje de reducción (figura 8). Ambas pérdidas son muy altas y necesariamente provocan cambios relevantes en la presión, velocidad y caudal mostrados en las ecuaciones 5 y 6.

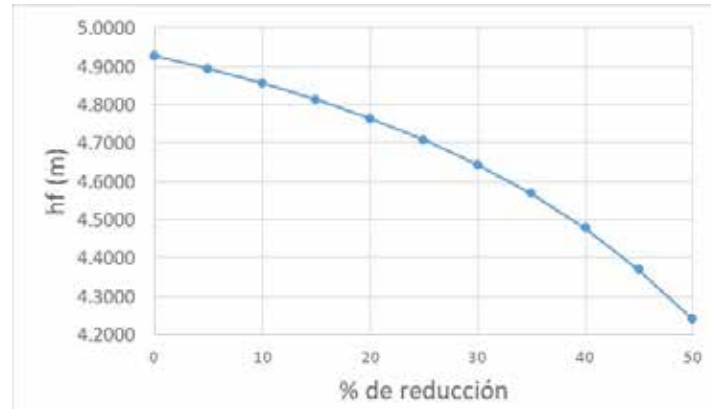


Figura 7. Pérdidas de carga, desde el depósito hasta la regadera

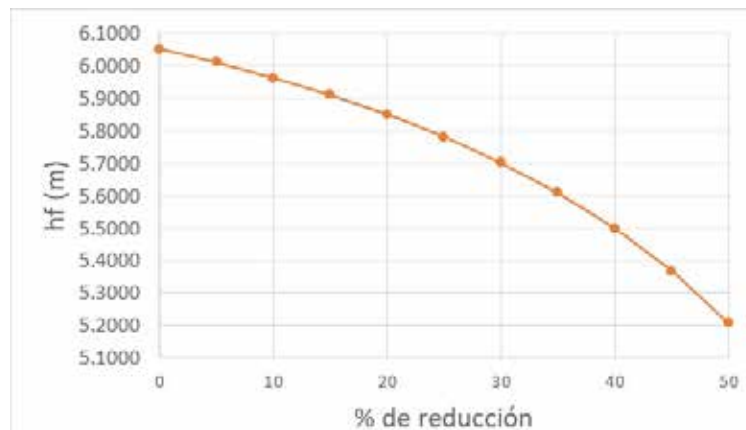


Figura 8. Pérdidas de carga, desde el depósito hasta el lavabo

4. OTROS PROBLEMAS ASOCIADOS POR LA PRESENCIA DE FE Y MN

Erogaciones generalmente no contempladas en los presupuestos de obra, en los proyectos de suministro de agua potable a poblaciones

Cuando existe presencia de Fe y Mn en el agua, la ley obliga a los fraccionadores o autoridades municipales a removerlos, es decir, dejar el agua bajo los parámetros de la NOM-127-SSA-1994. Así, por ley, los constructores y organismos operadores deben ejecutar los proyectos, y procesos físicos y/o químicos necesarios en los sistemas de abastecimiento de agua potable, tanto públicos como privados, a fin de hacerla apta para uso y consumo humano. Lo anterior implica construir una planta que permita remover el Fe y Mn. Éste es un proyecto generalmente no contemplado por los fraccionadores y organismos operadores de los sistemas de suministro de agua potable.

Problemas domésticos

La presencia de Fe y Mn en el agua provocan malestar en la población, entre otros: mal olor, cambio de coloración del agua, manchas en los muebles sanitarios (figura 9) y manchas en la ropa.



Figura 9. Incrustaciones y manchas en los muebles de baño. Fuente: Hidroquil, 2019

El mal olor se produce porque en los filtros y conductos de distribución, el Mn favorece el desarrollo de ciertos microorganismos que generan vapores fétidos con el desdoblamiento anaeróbico de sus complejos orgánicos, generando gases como resultado de la descomposición. El olor es desagradable y genera incomodidad al respirarlo. Por otra parte, el cambio de coloración del fluido se produce por oxidación cuando se mezcla el agua con el Mn o cuando éste se pone en contacto con el cloro (se vuelve oscura). La coloración del agua da un aspecto desagradable, incluso en los accesorios metálicos o cromados. Uno de los mayores malestares que causa este tipo de agua contaminada en las familias, son las manchas en las prendas de vestir, ya que la coloración se fija en la ropa causando daños estéticos.

5. POSIBILIDADES DE REMOCIÓN DEL FE Y MN DEL AGUA DEL FJG

Existen varios métodos para remover el Fe y Mn en la red de distribución del FJG, uno de ellos es el que se describe a continuación.

Adsorción-oxidación con zeolita natural

De acuerdo a Piña *et al.*, (2002) el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) desarrolló un proceso para la remoción de Fe y Mn, basado en la

combinación de tres procesos que se llevan a cabo en un sistema de filtración, que utiliza zeolita natural (tipo clinoptilolita) como medio de contacto:

- 1) Intercambio iónico como fase inicial, donde el Mn disuelto se fija en la superficie de la zeolita.
- 2) Oxidación del Mn sobre la superficie del medio, la cual permite la formación de una película de óxidos (MnOx(s)) sobre el grano del material.
- 3) La remoción del Mn disuelto en el agua, por adsorción sobre la película de óxidos formada sobre el grano del material (ver figura 10).

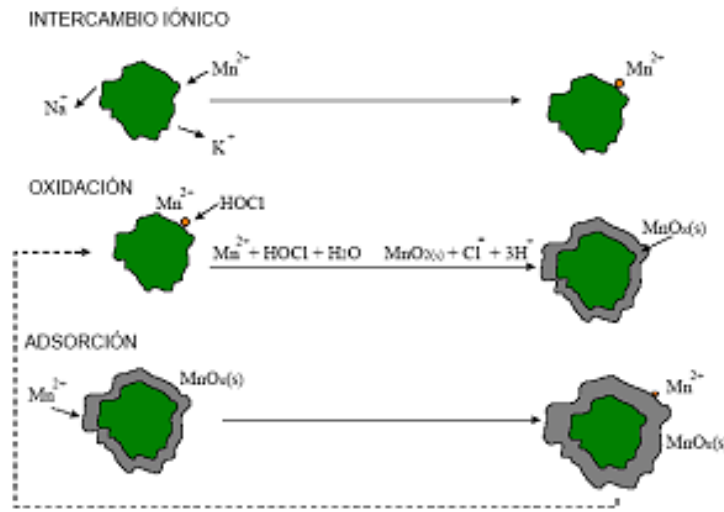


Figura 10. Etapas de formación de la capa de óxido de manganeso. Fuente: Piña *et al.*, 2002

Esta película es altamente selectiva de los iones de manganeso Mn (II), seguida de los iones de hierro Fe (II). Oxidando el Mn adsorbido en la superficie del grano se regenera la capacidad de adsorción del medio, asegurando una continua remoción de Fe y Mn durante la filtración. Esta tecnología tiene diversos aspectos positivos, tales como: poca pérdida de energía del flujo en su operación, debido a que la adsorción genera mínimas pérdidas de carga; el proceso se regenera en continuo con la aplicación de cloro, permitiendo que siempre se mantenga una alta capacidad de adsorción del Fe y Mn disuelto; el material adsorbente se acondiciona en el lugar usando la misma agua de la fuente a tratar, sin la necesidad de adicionar otras sustancias químicas. Una circunstancia a favor de este método de remoción es la alta disponibilidad de la zeolita en México. Por otra parte, esta metodología tiene además la ventaja de que ha sido probado mediante estudios piloto en diversos lugares del territorio nacional, como: Guaymas y Navojoa, Son., Veracruz, Ver., Zihuatanejo, Gro., Texcoco, Méx., Iztapalapa, CDMX., Culiacán, Sin., y Camargo, Chih.,

con plantas con caudales mayores a los del FJG. Adicionalmente, en algunos de estos lugares la concentración de Mn en el agua cruda ha llegado a ser hasta de 2.8 mg/l (es decir casi 77% por encima del valor que presenta la concentración de Mn en el FJG) y, en todos los casos, se han obtenido concentraciones del agua producida que cumplen con el límite máximo permisible de 0.15 mg/l de Mn y 0.3 mg/l de Fe, establecido por la NOM-127-SSA1-1994 de agua para uso y consumo humano.

De acuerdo a Petkova (1994) los métodos para la remoción de Fe y Mn utilizando *arena recubierta como medio filtrante*, generan remociones del orden de 97% de Mn y más de 85% de Fe. Con la zeolita se obtiene una remoción de 100% de los dos contaminantes, teniendo además la ventaja de poder fijar más fácil la película de los óxidos de Fe y Mn sobre la superficie de la zeolita.

6. CONCLUSIONES

Las razones técnicas que justifican la remoción de Fe y Mn del sistema de agua potable del FJG son los problemas hidráulicos, domésticos y económicos que causan a las familias del FJG. Las incrustaciones de sarro, Fe y Mn en el la red de tuberías de agua potable, generan problemas hidráulicos como los cambios de presión, velocidad, caudal y pérdidas de carga. En este trabajo se simularon las variaciones exponenciales del factor de fricción “f” que van desde un 2 % si se reduce un 10% el diámetro de la tubería, hasta un 11% cuando se reduce el 50% de la sección hidráulica. Esto impacta de forma proporcional a la pérdida de carga (h_f) que también tienen una variación de tipo exponencial. Se demostró que para un edificio de dos plantas que cuenta con un depósito de agua en el techo, la pérdida de carga del depósito hasta la regadera es de 0.689 m, cuando la sección hidráulica se reduce un 50%; y de 0.8456 m entre el depósito y el grifo del lavabo para el mismo porcentaje de reducción. Ambas pérdidas son muy altas y necesariamente provocan cambios relevantes en las presiones internas de la tubería y el caudal. Existen además otros problemas asociados con la presencia de Fe y Mn como: mal olor, cambio de coloración del agua, manchas en los muebles sanitarios y manchas en la ropa. El Fe y Mn del FJG deben ser removidos, como lo marca la ley, por exceder la norma NOM-127-SSA-1994 (Mundo, 2011), a través de una planta de remoción de Fe y Mn con zeolita, similar a la Planta “La Platanera” ubicada en la población de Villa Adolfo López Mateos en Culiacán Sinaloa, que se muestra en la foto 5.



Foto 5. Planta la Platanera. Fuente: Piña *et al.*, 2002

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los estudiantes Evelin Argentina Hernández González, Juan Carlos Guízar Sánchez, Cindy Jhoana Morales Gordillo, Kayra Jhoana Díaz Ascencio, Arcelio Miguel Domínguez González, Jesús Alberto López Pérez, Dulce Stefany Pérez Morales, quienes realizaron una campaña de medición de caudales en el río Suchiapa.

REFERENCIAS

- Anaya, D.A., Cauich, S.G.** (2014). Evaluación de ecuaciones de factor de fricción explícito para tuberías. *Educ. quím.*, 25(2), 128-134.
- Castro, M. J.** (1999). *Estructura geológica del estado de Chiapas*. Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de: <https://www.yumpu.com/es/document/read/14641680/estructura-geologica-del-estado-de-chiapas>
- Chow, V.T.** (1994). *Hidráulica de canales abierto*. Editorial McGraw-Hill. Bogotá, Colombia.
- DOF.** (1999). Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. *Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. Diario Oficial de la Federación (DOF). México, D.F. Recuperado de: <https://agua.org.mx/biblioteca/norma-oficial-mexicana-nom-127-ssa1-1994-modificacion-del-ano-2000/>
- Esteller, M.V., Díaz, D.C.** (2000). Calidad y contaminación del acuífero profundo del Valle de Toluca, estado de México. *1st Joint World Congress on Groundwater*, Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma del Estado de México.
- Flores, M.C., Miranda, S.A.** (2005). Sistema de automatización para el cálculo de pérdidas longitudinales en tuberías de agua potable. *Tesis de licenciatura*. Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador.
- Google Earth.** (2019). Mapa de Jardines del Grijalva, Chiapas, México en Google Earth. Recuperado el 19 de diciembre, 2019, de: <https://www.google.com.mx/maps/place/Jardines+del+Grijalva,+Chiapa+de+Corzo,+Chis./@16.7322722,-93.0387474,2117m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1sox85ed266c198d792f:oxf71fca2bfffcd1dd!8m2!3d16.7300754!4d-93.0319599>
- Guzmán, C.G., Ramírez, L., Thalasso, F., Rodríguez, N.S., Guerrero, B., Avelar, G.** (2011). *Evaluación de contaminantes en agua y sedimentos del río San Pedro en el estado de Aguascalientes*. Universidad y Ciencia Trópico Húmedo. 27(1):17-32.
- Hidroquil.** (2019). *hQ hidroquil, solamente agua*. Página WEB. Tomado de internet el 4 de abril de 2019: <http://www.hidroquil.com.ar/hogar/blog/2016/10/17/que-es-el-agua-dura-o-agua-con-sarro>
- Hernández, G. S., Gómez, V.A., Juárez, Y.P. Hernández, Z.G.** (2017). Determination of iron and manganese in the groundwater of the municipality of Apan, Hidalgo, Mexico. *Reaxion, Ciencia y Tecnología Universitaria*. Año 5, No. 1.
- Mundo, M.M.** (2011). Métodos para la remoción de hierro y manganeso en el Fraccionamiento Jardines del Grijalva: selección del método óptimo desde

- el punto de vista técnico y económico. *Informe técnico elaborado para Premezclados industriales S.A DE C.V (PREMIN)*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Mundo**, M.M., Hernández, G. E., Guízar, S.J, Morales, G.C., Díaz, A.K., Domínguez, G.A., López, P.J., Pérez, M.D. (2019a). Estimación del caudal del río Suchiapa en la época de estiaje. *Informe técnico*. Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas, Chiapas, México.
- Mundo**, M.M., Díaz, P. J.L. (2019b). Mediciones de hierro y manganeso en el agua de una comunidad ribereña y sus implicaciones en la salud humana. *Revista Salud en Chiapas*, Vol. VII. No. 3, pp. 146-149.
- Piña**, S.M.; Rivera, H.M.L.; Ramírez, G.A. (2002). *Remoción de hierro y manganeso en fuentes subterráneas de abastecimiento de agua potable mediante un proceso de adsorción-oxidación en continuo*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- Plascencia**, V.H., González, E.M., Ramírez, M.N., Álvarez, S.D., Musálem, C.K. (2014). Características físico-bióticas de la cuenca del río Grijalva. En: Medina, S. L. (2014). *Contexto de la Cuenca. Características y estrategias del Proyecto para el abordaje de la Cuenca Grijalva*. Coordinador: Leopoldo Medina Sansón. El Colegio de la Frontera Sur. México.
- Petkova**, S.V. (1994). Remoción de hierro y manganeso por medios de contacto no convencionales. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*. Jiutepec, Morelos, México.
- Ruíz**, A.D. (2014). Actualización del mapa geológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Tesis de licenciatura*. Facultad de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México. CDMX, México.
- Sotelo**, A.G. (1997). *Hidráulica general, volumen 1*. Editorial Limusa, México, D.F.
- Valencia**, E.C. (2011). Química del hierro y manganeso en el agua, métodos de remoción. *Tesis de licenciatura*. Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador.