

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL**

**REMOCIÓN DE MANGANESO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
AGUA POTABLE DE TOCANCIPÁ – CUNDINAMARCA.**

**DIANA BARRERA MARTÍNEZ**

**Bogotá, D.C., 30 de noviembre de 2017**



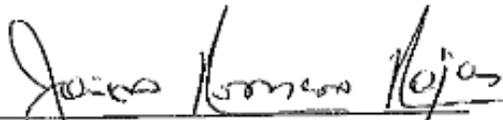
**REMOCIÓN DE MANGANESO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
AGUA POTABLE DE TOCANCIPÁ – CUNDINAMARCA.**

**TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA  
CIVIL, CON ÉNFASIS EN INGENIERA AMBIENTAL**

**JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS  
DIRECTOR**

**Bogotá, D.C., 30 de noviembre de 2017**

La tesis de maestría titulada “Remoción de Manganeso en la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Tocancipá – Cundinamarca.”, presentada por Diana I. Barrera Martínez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en ingeniería ambiental.



---

Firma del director del proyecto  
Jairo A. Romero Rojas

---

Firma del jurado  
Germán R. Santos Granados

---

Firma del jurado  
Héctor Matamoros Rodríguez

Bogotá, D.C., 30 de noviembre de 2017

## **Agradecimientos**

Agradezco primero que todo a Dios por brindarme la sabiduría para sacar este proyecto adelante, a mi familia por su apoyo y acompañamiento durante este proceso formativo.

Al ingeniero David R. Prieto Gamboa, por ser siempre mi motivador, por apoyarme incondicionalmente, por sus sugerencias y comentarios, los cuales fueron importantes para desarrollar este trabajo de investigación.

Quiero agradecer de manera especial y sincera al Ingeniero JAIRO ROMERO ROJAS, por su apoyo y confianza en mi trabajo, su capacidad para guiar cada idea y por facilitarme siempre los medios suficientes para llevar a cabo todas las actividades propuestas durante el desarrollo de esta tesis.

## Resumen

El manganeso es aportado naturalmente a las aguas superficiales y subterráneas a partir de las rocas y el suelo, por ello es muy común que se encuentre en fuentes de abastecimiento de sistemas de acueducto, como es el caso de estudio del municipio de Tocancipá Cundinamarca, donde este elemento genera dificultad para ser removido por un sistema convencional de purificación, los valores promedio de la concentración del manganeso en el río Bogotá están entre 0.05 y 0.5 mg/l y el valor máximo permisible de conformidad con la resolución 2115 de 2007 es de 0.1 mg Mn/l.

La forma más común de eliminar el manganeso es por medio de la oxidación química y posterior separación física. Así, se transforma el manganeso que se encuentra disuelto en manganeso oxidado, el cual se sedimenta en la columna de agua. Esto se realiza adicionando agentes químicos, como el permanganato de potasio, dióxido de cloro, cloro, ozono y peróxido de hidrogeno, siendo este último el utilizado en el caso de estudio.

De acuerdo con este trabajo de investigación, las caracterizaciones realizadas durante enero a diciembre del año 2015, en el afluente del sistema de tratamiento, en las diferentes unidades de proceso y el agua tratada se pudo concluir que el la oxidación de manganeso Mn con peróxido de hidrógeno  $H_2O_2$  no es un método muy efectivo y poco común, el pH tiene un fuerte efecto sobre

la química y la efectividad del peróxido de hidrógeno, el pH impacta la solubilidad y reactividad del catalizador hacia el peróxido de hidrógeno, las aplicaciones de peróxido incluyen la inyección de ácidos o álcalis para modificar el pH a un rango óptimo, el cual debe oscilar entre 9 a 11 unidades, por tanto este sistema convencional evaluado no garantiza el cumplimiento continuo del valor máximo permisible para agua potable de 0.1 mg Mn/l, definido por la resolución 2115 de 2007,

## Tabla de Contenido

CAPITULO I .....	13
INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA .....	13
1.1.    INTRODUCCIÓN .....	13
1.2.    OBJETIVOS.....	14
1.2.1.    Objetivo general. ....	14
1.2.2.    Objetivos específicos.....	14
1.3.    METODOLOGÍA:.....	15
1.3.1.    Recolección de información: .....	15
1.3.2.    Toma de Muestras. ....	15
CAPITULO II .....	16
MARCO TEÓRICO .....	16
2.1.    GENERALIDADES. ....	16
2.2.    PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL MANGANESO .....	22
2.3.    MÉTODOS DE REMOCIÓN DE MANGANESO.....	29
2.3.1.    Aireación–Filtración. ....	31
2.3.2.    Oxidación-Filtración. ....	32
2.3.3.    Oxidación.....	33
2.3.4.    Filtración en medios acondicionados. ....	43
2.3.5.    Filtración directa con la aplicación de sustancias químicas. ....	43
2.3.6.    Estabilización por secuestro.....	44

2.3.7.	Métodos biológicos. ....	45
2.3.8.	Remoción in-situ.....	45
2.3.9.	Intercambio iónico. ....	46
2.4.	SISTEMA CONVENCIONAL DE POTABILIZACION DE AGUA MUNICIPIO DE TOCANCIPÁ – CUNDINAMARCA.....	47
2.4.1.	Captación.....	51
2.4.2.	Aducción. ....	52
2.4.3.	Desarenador. ....	53
2.4.4.	Conducción. ....	53
2.4.5.	Coagulación. ....	54
2.4.6.	Floculación .....	55
2.4.7.	Sedimentación .....	57
2.4.8.	Filtración .....	58
2.4.9.	Desinfección.....	59
2.4.10.	Cámara de contacto.....	61
2.4.11.	Costos de tratamiento – Año 2015.....	62
2.5.	MARCO NORMATIVO .....	64
CAPITULO III .....		68
3.1.	PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE TOCANCIPÁ. ....	68
3.1.1.	Mezcla Rápida.....	68

3.1.2.	Floculador Mecánico.....	69
3.1.3.	Sedimentador de Alta Tasa. ....	70
3.1.4.	Filtros.....	71
3.1.5.	Tanque de Contacto de Cloro. ....	72
3.2.	MONITOREO DE MANGANESO EN LA PTAP.....	72
3.2.1.	Muestreos.....	72
3.2.2.	Análisis.....	73
CAPITULO IV.....		74
4.1.	RESULTADOS .....	74
4.1.1.	Turbiedad. ....	75
4.1.2.	pH. ....	81
4.1.3.	Alcalinidad. ....	84
4.1.4.	Color.....	87
4.1.5.	Hierro.....	93
4.1.6.	Manganeso.....	96
4.2.	ANALISIS DEL PROCESO DE OXIDACIÓN .....	102
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		105
BIBLIOGRAFIA.....		107

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estados de oxidación de las especies de manganeso.....	23
Tabla 2. Distribución y abundancia del manganeso en la naturaleza. ....	25
Tabla 3. Oxidación del Manganeso .....	35
Tabla 4. Oxidación del manganeso con permanganato de Potasio. ....	36
Tabla 5. Oxidación del manganeso con Cloro. ....	38
Tabla 6. Oxidación del manganeso con Ozono. ....	39
Tabla 7. Comparacion de los potenciales de oxidación. ....	40
Tabla 8. Datos costo por producción de agua en (m <sup>3</sup> ) mensual. ....	63
Tabla 9. Características Químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana. ....	66
Tabla 10. Parámetros de Operación de la Canaleta Parshall. ....	69
Tabla 11. Parametros de Operación de los Floculadores. ....	70
Tabla 12. Parametros de Operación Sedimentador de Alta Tasa. ....	71
Tabla 13. Parametros de Operación de la Filtración. ....	71
Tabla 14. Parametros de Operación Tanque de Contacto de Cloro. ....	72
Tabla 15. Promedio mensual de Turbiedad en los cuatro puntos de muestreo ... .....	76
Tabla 16. Valores promedio mensuales de pH en los cuatro puntos de muestreo.....	81
Tabla 17. Valores de alcalinidad promedio mensual en los cuatro puntos de muestreo. ....	85
Tabla 18. Valores de Color aparente promedio mensual en los cuatro puntos de muestreo. ....	88

Tabla 19. Concentraciones promedio de Hierro mg/l.....	94
Tabla 20. Concentración de manganeso en los cuatro puntos de muestreo. .	97
Tabla 21. Resumen de Condiciones y resultados de la oxidación con peróxido de hidrógeno – 2015.....	103

## INDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1. Resultados de remoción de manganeso con diferentes agentes oxidantes. ....	42
Gráfica 2. Datos de producción PTAP Los Patos - 2015 .....	63
Gráfica 3. Datos de turbiedad agua cruda. ....	77
Gráfica 4. Valores mínimos, medios y máximos de precipitación en la cuenca media del río Bogotá. ....	78
Gráfica 5. Datos de turbiedad en el efluente del sedimentador. ....	78
Gráfica 6. Datos de turbiedad en el efluente de los filtros. ....	79
Gráfica 7. Datos de turbiedad en el efluente de la planta de tratamiento. ....	80
Gráfica 8. Valores de pH en el afluente de la planta de tratamiento. ....	82
Gráfica 9. Valores de pH en el efluente del sedimentador. ....	83
Gráfica 10. Valores de pH agua filtrada. ....	83
Gráfica 11. Valores de pH en el efluente de la planta de tratamiento. ....	84
Gráfica 12. Alcalinidad en el afluente de la planta de tratamiento. ....	86
Gráfica 13. Alcalinidad en el efluente del sedimentador. ....	86
Gráfica 14. Alcalinidad en el efluente de la planta de tratamiento. ....	87

Gráfica 15. Color en el afluente de la planta de tratamiento. ....	89
Gráfica 16. Color en el efluente del sedimentador. ....	90
Gráfica 17. Color en el efluente de los filtros. ....	91
Gráfica 18. Color en el efluente de la planta de tratamiento. ....	92
Gráfica 19. Eficiencia del sistema de tratamiento para remoción de color. ....	93
Gráfica 20. Hierro en el afluente de la planta de tratamiento. ....	95
Gráfica 21. Hierro en el efluente de la planta de tratamiento. ....	95
Gráfica 22. Porcentaje de Remoción de Hierro. ....	96
Gráfica 23. Concentración de manganeso en el agua cruda. ....	99
Gráfica 24. Concentraciones de manganeso en el efluente del sedimentador. ....	99
Gráfica 25. Concentración de Manganeso en el efluente de filtros. ....	100
Gráfica 26. Datos de Manganeso en el efluente de la planta de tratamiento. ....	101
Gráfica 27. Porcentajes de Remoción de Manganeso de la PTAP. ....	102

## **CAPITULO I**

### **INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA**

#### **1.1. INTRODUCCIÓN**

Entre los usos que se le da al agua del río Bogotá se encuentra el de consumo humano y doméstico en sectores urbanos, por esta razón el municipio de Tocancipá cuenta con concesión de aguas y posterior sistema convencional de potabilización para abastecer aproximadamente a 11,000 habitantes de su zona rural y urbana, la cual presenta tasas de crecimiento elevadas debidas principalmente al fenómeno de inmigración de personas de todas partes del país, esto se da por la expectativa de empleo que genera el crecimiento del sector industrial ubicado en el municipio, por tal razón es de suma importancia garantizar el tratamiento y la oferta de agua potable para la creciente demanda de la zona de estudio.

El manganeso es uno de los elementos químicos que ha generado problemas en la planta de potabilización del municipio de Tocancipá, denominada Los Patos, por la dificultad para ser removido por un sistema convencional de purificación, los valores promedio de la concentración del manganeso en el río Bogotá están entre 0.05 y 0.5 mg/l y el valor máximo permisible de conformidad con la resolución 2115 de 2007 es de 0.1 mg Mn/l.

Este documento incluye el análisis de las condiciones actuales de tratamiento del sistema, las características del agua cruda, tratada y la evaluación de la remoción de manganeso en el sistema existente.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo general.**

Evaluar la remoción de manganeso en la planta de purificación de agua potable del Municipio de Tocancipá, Cundinamarca.

### **1.2.2. Objetivos específicos.**

- Determinar las concentraciones de manganeso, en época de verano y época de lluvia, del agua cruda afluente de la planta de purificación de agua potable del Municipio de Tocancipá.
  
- Determinar las concentraciones de manganeso en el afluente del proceso de coagulación y filtración, así como del agua efluente de la planta de purificación de agua potable del Municipio.

- Realizar ensayo de jarras para optimizar la remoción de manganeso de la PTAP.

### **1.3. METODOLOGÍA:**

#### **1.3.1. Recolección de información:**

- **Información Primaria:** En esta etapa se recolectó la información primaria, de documentos de referencia y la tomada en campo, se realizaron visitas para conocer detalladamente la planta de purificación de agua del Municipio de Tocancipá y su proceso de operación.
- **Información Secundaria:** Se recolectó la información secundaria, relacionada con el caso de estudio, se consultó diferente bibliografía para conocer la naturaleza del manganeso, la presencia de este elemento en el agua y los métodos de remoción del mismo.

#### **1.3.2. Toma de Muestras.**

Se realizó la toma de muestras para determinar las concentraciones de manganeso, utilizando el protocolo 3500-Mn del Standard Methods en:

- En el afluente al sistema de purificación de agua potable.
- En el efluente del sedimentador (agua clarificada).

- En el efluente del proceso de filtración.
- En el efluente del sistema de potabilización.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. GENERALIDADES.**

El municipio de Tocancipá está localizado en el valle del Rio Bogotá, el cual surca su territorio de nororiente a suroriente y lo fracciona en dos zonas; al norte se concentra la actividad agroindustrial e industrial y al sur, el área urbana, la vivienda rural y el polígono industrial que comparte con Sopó y Briceño.

El núcleo urbano está situado en el centro del área municipal y se relaciona directamente con la Autopista del Norte, actualmente cuenta con aproximadamente 34.000 habitantes, con una cobertura de acueducto de 98%.

La mayoría de sus tierras se encuentran en zonas de planicie, lo cual amplía las Posibilidades de urbanización y fortalece la vocación para implantar y generar usos periurbanos, grandes equipamientos de servicio regional e industrial.

➤ **Localización geográfica**

Latitud Norte 4°58' Longitud Oeste 73°55'

Altura: 2.574 m.s.n.m

Temperatura: 14°C

Área: 73,51 Km<sup>2</sup>

➤ **Límites**

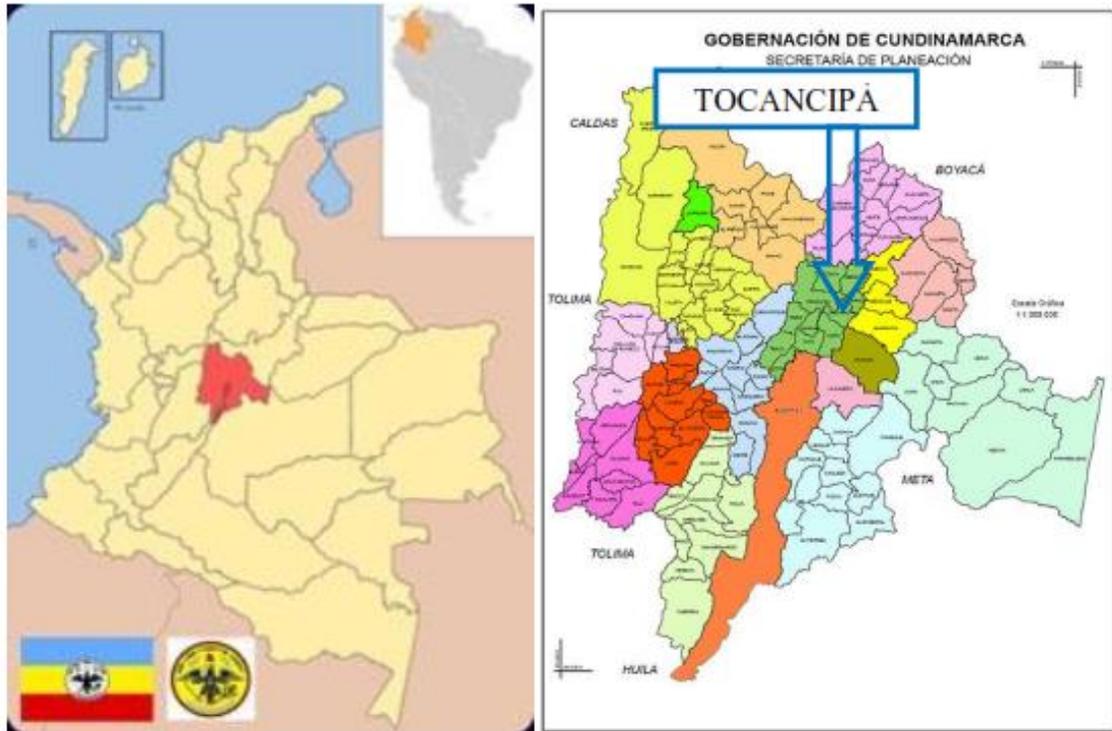
Los límites geográficos del Municipio de Tocancipá están definidos de la siguiente manera:

Por el Norte: Con Gachancipá y Zipaquirá.

Por el Oriente: Con Guatavita y Gachancipá.

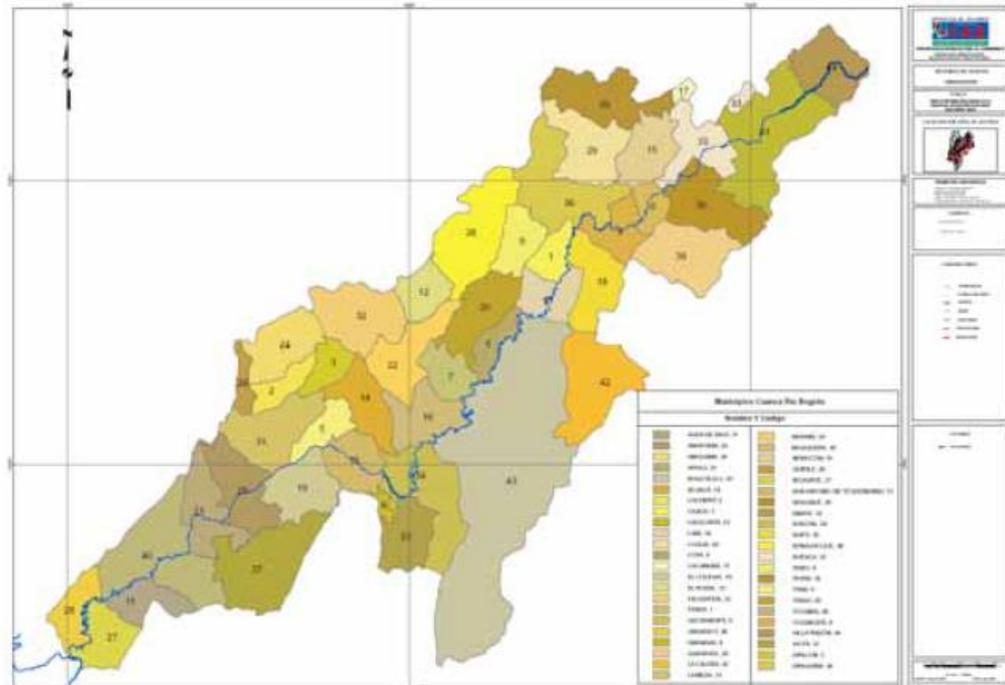
Por el Sur: Con Guasca y Sopó.

Por el Occidente: Con Cajicá y Zipaquirá.



**Figura 1. Ubicación Geográfica del Municipio de Tocancipá – Cundinamarca.**

La cuenca hidrográfica sobre la que está localizada la planta de tratamiento del municipio de Tocancipá y a su vez su fuente de abastecimiento es el río Bogotá, ubicada en el departamento de Cundinamarca. Limita al norte con el departamento de Boyacá, al sur con el departamento del Tolima, al occidente con las cuencas de los ríos Sumapaz, Magdalena, Negro, Minero, Suárez, Blanco, Gacheta y Machetá. La cuenca del río Bogotá está conformada por 45 municipios y el Distrito Capital, como se muestra en la Figura 2.



FUENTE: CAR-Subdirección de Recursos Naturales 2009

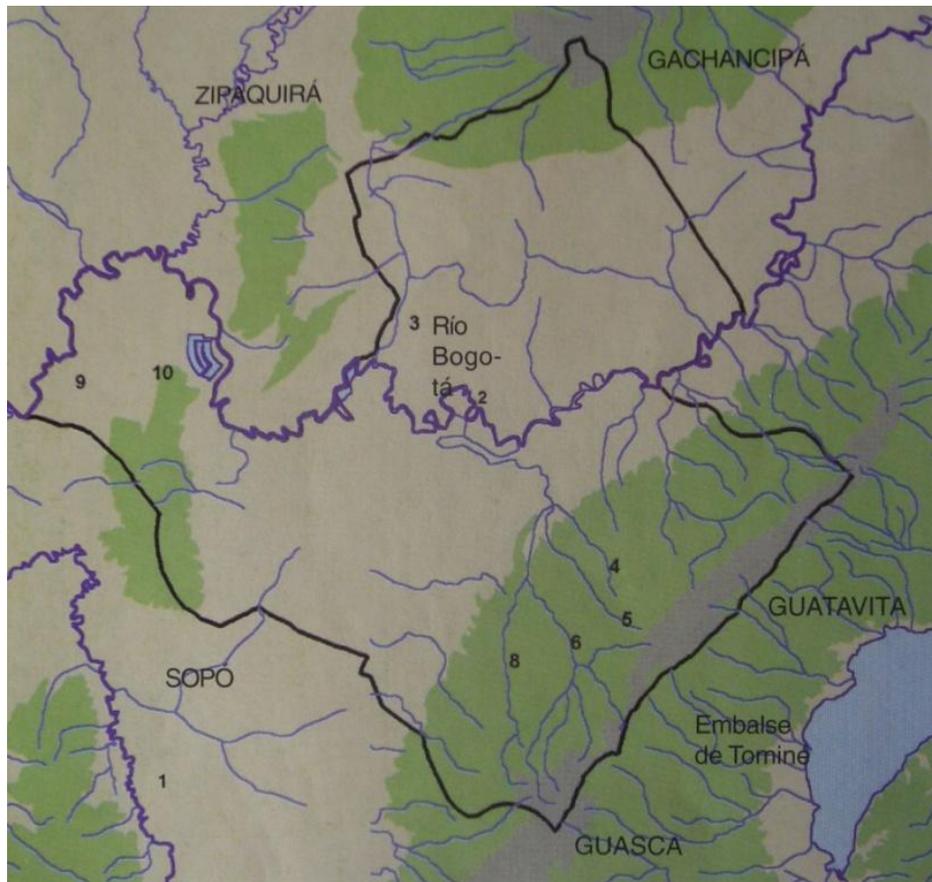
**Figura 2. Cuenca del Río Bogotá**

El río Bogotá nace a los 3300 msnm en el municipio de Villapinzón y desemboca a los 380 msnm en el río Magdalena en el municipio de Girardot. En su recorrido de 336 Km, el río Bogotá recibe las aguas de los ríos Sisga, Neusa, Tibitoc, Tejar, Negro, Teusacá, Frío, Chicú, Salitre, Fucha, Tunjuelo, Siecha, Balsillas, (que a su vez recoge las aguas de los ríos Subachoque y Bojacá), Calandaima y Apulo.

El Acuerdo CAR 43 de 2006, establece que la cuenca del Río Bogotá, se divide en tres sectores.

- Cuenca Alta: entre el municipio de Villapinzón y la estación hidrometeorológica Puente La Virgen.
  
- Cuenca Media: entre la estación hidrometeorológica Puente La Virgen y las compuertas Alicachín, en inmediaciones del embalse del Muña (A su vez se divide en cuenca media occidental y oriental, en la cual se localiza el Distrito Capital.
  
- Cuenca Baja: entre El Embalse del Muña y la desembocadura del río Bogotá en el río Magdalena.

El municipio de Tocancipá se encuentra localizado geográficamente en la cuenca media del río Bogotá., cuyas características de calidad del agua se describen a continuación.



**Figura 3. Georreferenciación del municipio de Tocancipá en la cuenca río Bogotá.**

➤ **Cuenca media.**

La cuenca media del río Bogotá se ve afectada por vertimientos industriales y por la carga residual municipal de los efluentes de la PTAR existentes (entre ellas, Zipaquirá, Cajicá, Chía, Tocancipá). Sin embargo, la causa fundamental del deterioro de la calidad del río en la cuenca media, la constituyen los vertimientos de la ciudad de Bogotá, a través de los ríos urbanos y canales de aguas de escorrentía. (CAR, 2006)

El sistema de tratamiento de agua potable del municipio de Tocancipá es de tipo convencional y abastece aproximadamente a 11.000 habitantes del municipio ubicados en el casco urbano, las veredas de Canavita, Verganzó y Tibitoc, los restantes se abastecen de los sistemas de tratamiento de La Esmeralda, La Fuente y unos sectores con agua comprada en bloque al Acueducto de Bogotá.

## **2.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL MANGANESO**

El manganeso es un elemento químico bastante común. Es el quinto metal más abundante en la corteza terrestre y el segundo metal de transición común, después del hierro. El manganeso tiene ocho estados de oxidación, tal y como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1. Estados de oxidación de las especies de manganeso.**

<b>ESPECIE</b>	<b>ESTADO DE OXIDACIÓN</b>
<b>Mn</b>	0
<b>Mn<sup>2+</sup></b>	II
<b>Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>(s)</b>	2.67
<b>Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(s)</b>	III
<b>MnO<sub>2</sub>(s)</b>	IV
<b>MnO<sub>4</sub><sup>3-</sup></b>	V
<b>MnO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	VI
<b>MnO<sub>4</sub><sup>-</sup></b>	VII

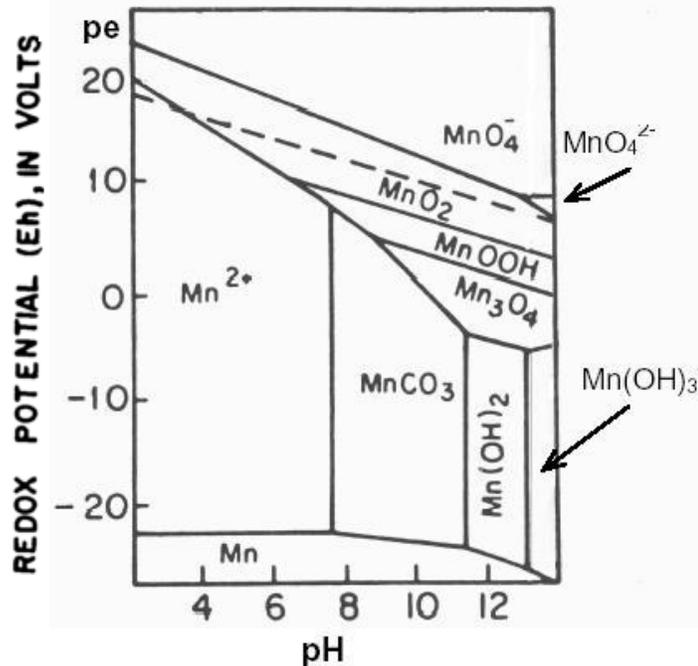
Fuente: Huerta Díaz, M. A. (2004).

No todos los estados de oxidación del manganeso son relevantes en el tratamiento del agua. En la naturaleza, sin embargo, el manganeso se encuentra, sobre todo, en los estados de oxidación (II), (III), (IV).

El catión Mn<sup>2+</sup> (manganeso) es la forma soluble más importante de manganeso en la naturaleza.

La estabilidad termodinámica de los diferentes hidruros de manganeso se determina por presión parcial de oxígeno, condiciones redox (pe), pH y temperatura. La Figura 4, muestra la distribución de los estados de oxidación

predominantes y composiciones según el pH y el potencial de oxidación – reducción.



**Figura 4. Estados de oxidación.**

Fuente: Ramstedt Madeleine, (2004)

El ión Mn<sup>3+</sup> (mangánico) es termodinámicamente inestable en solución neutral, a menos que sea fuertemente acomplejado, y es rápidamente convertido a Mn<sup>2+</sup> y a MnO<sub>2</sub>. El manganeso (III) y el manganeso (IV) se encuentran generalmente como óxidos insolubles u óxidos acuosos, el manganeso (IV) es más notable posiblemente como MnO<sub>2</sub>. Estos óxidos son de color marrón o negro. La oxidación del manganeso (II) puede conducir a una variedad de óxidos, dependiendo de las condiciones exactas de la oxidación; algunas posibilidades son β-, y - MnO<sub>2</sub>, -, β-, y - MnOOH, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, y el Mn(OH)<sub>3</sub>. Cualquier oxidación no controlada rígidamente, probablemente, dará lugar a

una mezcla no estequiométrica de estos óxidos. Tales óxidos mezclados se refieren a menudo como “MnO<sub>x</sub>” por conveniencia, con x entendiéndose a partir del 1,0 a 2,0. (Díaz, 2004).

Una idea de la distribución y de la abundancia de manganeso en la naturaleza se muestra en la Tabla 2. Las concentraciones se dan en partes por millón.

**Tabla 2. Distribución y abundancia del manganeso en la naturaleza.**

<b>DISTRIBUCION Y ABUNDANCIA DEL MANGANESO (ppm)</b>	
<b>Tierra</b>	0,8 - 130
<b>Tierra y rocas</b>	200 - 300
<b>Agua de lagos</b>	0,004 – 0,2
<b>Sedimento de lagos</b>	103 – 105
<b>Aguas Superficiales de océanos</b>	104 – 103
<b>Agua de Ríos</b>	102 – 103
<b>Aguas Subterráneas</b>	1 – 10
<b>Plantas terrestres</b>	20 – 500

---

Fuente: Huerta Díaz, M. A. (2004).

El manganeso se produce principalmente en rocas sedimentarias, metamórficas e ígneas, pero Mn también está presente en forma de óxidos de manganeso coloidal en la mayoría de los suelos y aguas. En las rocas se encuentra

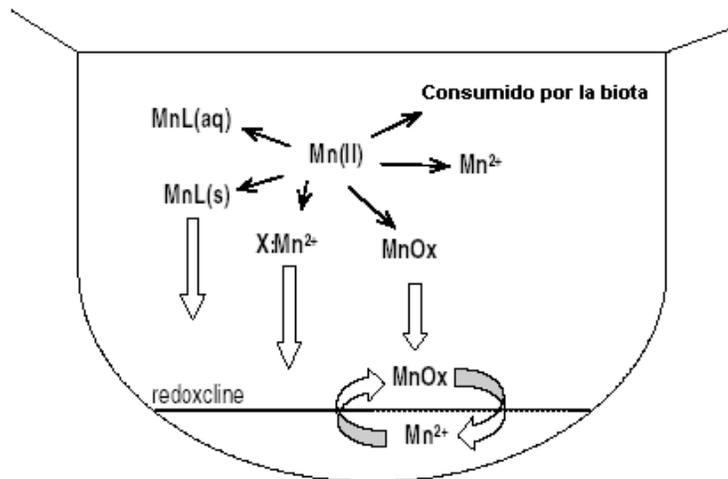
aproximadamente el 0,1% de manganeso, lo que hace que el manganeso sea el décimo elemento más abundante de la corteza terrestre. Aunque es menos abundante que el hierro y el aluminio y es el más móvil de los tres. La movilidad puede explicarse en parte por la mayor solubilidad de los hidróxidos de Mn en comparación con los óxidos de Al o Fe a temperatura ambiente pero también por la menor velocidad de oxidación de Mn (II) comparada con Fe (II).

La movilidad es mayor en los suelos árticos y templados, que tienen un alto contenido orgánico y acidez. En estas regiones, Mn se lixivia del suelo y se transporta en forma disuelta o en coloides pequeños en lagos y ríos. Los suelos tropicales o áridos son generalmente más alcalinos y un contenido relativo más bajo de material orgánico. Así, en estas regiones, Mn (II) se oxida dentro del suelo o forma revestimientos inmóviles sobre superficies rocosas o sobre el suelo. La industria del metal y la combustión de combustibles fósiles son las principales fuentes antropogénicas, mientras que las fuentes biogénicas son las plantas y animales descompuestos. Para los animales, el manganeso es un nutriente esencial, ya que forma sitios reactivos en diferentes enzimas,

En el ciclo geoquímico del manganeso, el Mn (II) disuelto se produce principalmente a partir de la intemperie de rocas metamórficas e ígneas. Los iones Mn (II) se transportan en el agua donde se forman complejos con diferentes ligandos, se adsorben sobre las superficies de las partículas, diferentes óxidos o hidróxidos de manganeso. El proceso de oxidación puede ser autocatalítico, pero más comúnmente la oxidación del manganeso está

mediada por microbios. Cuando las partículas crecen en agua, eventualmente se asientan en el fondo de lagos y se convierten en parte de los sedimentos. Sin embargo, si las condiciones redox se alteran, las partículas de manganeso se reducen de nuevo en iones Mn (II).

Estos iones se difundirán a lo largo los reductores y oxidantes según el potencial redox, hasta que alcancen condiciones oxidantes donde serán reoxidadas y formarán partículas de óxido. Este ciclo alrededor del redox frontera conduce a un enriquecimiento de Mn a profundidades específicas, que pueden detectarse en lagos. El límite redox se encuentra generalmente cerca o dentro de los sedimentos en lagos poco profundos mientras que, en lagos estratificados más profundos con alta concentración de materia orgánica, están presentes en la columna de agua. En los ríos, donde el agua está bien oxigenada y en movimiento constante, estos límites redox son raros y el manganeso está presente principalmente en la forma de partículas (hidruro) de óxido coloidal, aunque, Mn (II) disuelto también puede estar presente dependiendo de la temporada. (Ramstedt, 2004)



**Figura 5. Ciclo del manganeso.**

Fuente: Tebo et al., 2004

Óxidos de manganeso. La carga superficial del MnO<sub>2</sub> se determina, en gran parte, por el pH de la solución, siendo más negativo, cuanto más se aumenta el pH, como resultado del incremento en la relación de los iones OH<sup>-</sup>, con respecto a los iones H<sup>+</sup>. A pH muy bajo, los iones H<sup>+</sup> predominan en la superficie y la carga superficial neta del MnO<sub>2</sub> coloidal es positiva. Menos seguro es el valor exacto en el cual ocurre el equilibrio del hidrógeno y de los iones hidróxidos, por ejemplo, el punto de carga cero. Posselt, Anderson, y Weber (1968) citan a varios autores que han determinado que el punto cero de la carga para el dióxido de manganeso es a partir de un pH entre 2.8 y 4.5. De esto, Posselt, Anderson, y Weber, (1968) concluyeron que está claro que el dióxido de manganeso exhibe una carga superficial negativa neta dentro del rango de pH (5 a 11), de principal interés para aguas naturales y para las operaciones convencionales del tratamiento de aguas (Hanson *et al.*, 1999).

Los materiales anfóteros son usados para la adsorción de especies metálicas por su relativa alta área superficial y sus cargas de superficie características. El comportamiento de la adsorción de especies metálicas en medios específicos, como las arenas silíceas, suelos, carbón activado granular y óxidos de hierro y manganeso, han sido estudiadas extensivamente en el pasado (Stumm 1992; Stumm y Morgan 1996; Langmuir 1997). Los óxidos de manganeso han mostrado tener una afinidad por las especies metálicas, incluyendo Pb, Cu, Cd y Zn. La adsorción de especies metálicas cerca al PZC ilustran que las fuerzas químicas de adsorción específicas, en adición con las fuerzas electrostáticas, están involucradas en el proceso de adsorción (Liu D *et al.*, 2004).

### **2.3. MÉTODOS DE REMOCIÓN DE MANGANESO.**

El manganeso debe eliminarse de las aguas de consumo, por diversas razones:

- Causa de corrosión o de obstrucción de las tuberías (directamente por precipitación y formación de depósitos, o indirectamente favoreciendo el desarrollo de bacterias específicas)
- Aspecto del agua
- Sabor metálico
- Inconvenientes en el lavado de la ropa
- Puede afectar elementos que son útiles en actividades del día a día, por ejemplo, lavadoras, ropa, entre otros.

- Durante el embarazo, se ha demostrado que el manganeso atraviesa la barrera sangre cerebro y que una cantidad limitada de manganeso puede atravesar la placenta. (U.S.Department of Health and Human Services, 2012).
- En experimentos con animales, se han demostrado problemas en el crecimiento, anormalidades en el esqueleto, deficiencias reproductivas y ataxia en animales recién nacidos (E.P.A., 2004)
- Por medio de experimentos de laboratorio desarrollados con animales, se ha demostrado que el manganeso genera daño al esperma y produce cambios adversos en el desarrollo reproductivo del hombre (U.S. Department of Health and Human Services, 2012).
- Se ha observado que genera afectaciones en los riñones y en el sistema urinario en ratas alimentadas con altos niveles de manganeso. La enfermedad incluye la inflamación de riñones y la producción de cálculos renales (U.S. Department of Health and Human Services, 2012).
- El manganeso causa daños en el sistema nervioso, generando la enfermedad del Parkinson. (U.S. Department of Health and Human Services, 2012).

Algunas de las opciones para remover el manganeso son el tratamiento in situ, el tratamiento biológico, la oxidación química, la separación física, el intercambio iónico, entre otros (E.P.A., 2006).

En cuanto al tratamiento biológico, este aprovecha la capacidad de algunas bacterias para oxidar el elemento. Algunas de estas bacterias son Sphaerotilus, Leptothrix y Crenothrix (E.P.A., 2006). Para tener un buen tratamiento se necesitan niveles de oxígeno superiores a 5 mg/L, el pH debe ser mayor a 7.5 y el potencial redox debe encontrarse en un rango entre 300 y 400 mV. Así mismo, para garantizar la supervivencia de las bacterias, el agua a tratar no puede tener sustancias perjudiciales para dichos microorganismos. De tal forma que no puede contener cloro. Por esta razón, es muy importante revisar los niveles de este elemento después del pretratamiento del agua.

La forma más común de eliminar el manganeso es por medio de la oxidación química y posterior separación física. Así, se transforma el manganeso que se encuentra disuelto en manganeso oxidado, el cual se sedimenta en la columna de agua. Esto se realiza manipulando el pH y adicionando químicos, como el permanganato de potasio, dióxido de cloro, cloro u ozono (Gantzer, 2009).

### **2.3.1. 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, 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 (Sommerfeld., 1999). 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.

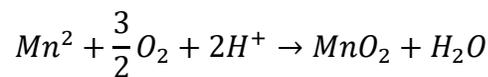
### **2.3.2. Oxidación-Filtración.**

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 ( $Na_2CO_3$ ). Como agentes oxidantes pueden usarse gas cloro o hipoclorito. 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 (Sommerfeld., 1999).

### 2.3.3. Oxidación.

La oxidación es el proceso mediante el cual el manganeso pasa de un estado reducido ( $Mn^{2+}$ ) a un estado oxidado ( $MnO_2$ ) (DiToro, 2001). El principal agente para realizar este proceso es el oxígeno.



Una de las formulaciones propuestas para representar el proceso de oxidación es la de reacción cinética, en la cual se realiza la incorporación del pH. En esta relación, la tasa tiene en cuenta el oxígeno disuelto y el manganeso divalente presentes en el agua (DiToro, 2001) y fue estudiada por Morgan (1967) y por Stumm et al. (1970). La tasa se encuentra expresada en la ecuación.

$$RMn_{Oximn} = k_{MnO_2}[O_2][OH^-]^2[Mn]$$

Donde  $RMn_{Oximn}$  representa la tasa de oxidación del manganeso ( $mg\ L^{-1}\ d^{-1}$ ),  $k_{MnO_2}$  es la constante del proceso,  $O_2$  es la concentración de oxígeno disuelto en el agua ( $mg\ L^{-1}$ ),  $OH^-$  es la concentración de aniones hidroxilo ( $mg\ L^{-1}$ ), y  $Mn$  es el manganeso divalente ( $mg\ L^{-1}$ ).

Los procesos de oxidación química juegan varios papeles importantes en el tratamiento del agua potable. Los oxidantes químicos se utilizan para la oxidación de especies inorgánicas reducidas, como el ion ferroso, Fe(II); el manganeso, Mn(II); el sulfuro, S(-II); y compuestos orgánicos de riesgo sustitutivo, como el tricloroetileno (TCE) y la atracina. Los oxidantes pueden también usarse para destruir los compuestos que causan olor y sabor y eliminan color. Adicionalmente, en algunos casos pueden aumentar el rendimiento, o reducir la cantidad requerida de coagulantes.

Como muchos oxidantes también tienen propiedades biocidas, pueden utilizarse para controlar el crecimiento acuático perjudicial, como las algas en pretratamientos, y como desinfectante principal para cumplir los requisitos CT (concentración de desinfectante multiplicado por tiempo de contacto). Estos oxidantes se añaden a menudo en cabeza de las plantas de tratamiento, antes del tanque de mezcla rápida, pero también pueden emplearse después de clarificación, antes de filtración, después de que una sustancial parte de la demanda de oxidante haya sido eliminada. Los oxidantes químicos más comunes usados en tratamiento de aguas son el ion cloro, ozono, dióxido de cloro y permanganato. El ozono se usa, a veces, en unión con el peróxido de hidrógeno o radiación ultravioleta para producir radicales que tienen propiedades oxidantes altas.

**Tabla 3. Oxidación del Manganeso**

OXIDANTE	POTENCIAL DE OXIDACIÓN mg /mg Mn <sup>2+</sup>	Sólidos* lb/lb(Kg/kg)Mn <sup>2+</sup>
O <sub>2</sub>	0,29	1,58

- Cantidad de sólido precipitado, basado en el peso del óxido de manganeso MnO<sub>2</sub>. Es altamente probable que la fracción del sólido este compuesta por hidróxido de óxido de manganeso MnOOH (manganita) y carbonato de manganeso MnCO<sub>3</sub>.

**Fuente:** Water Treatment Plant Design - fifth Edition.

#### *2.3.3.1. Oxidación del Manganeso (II) con permanganato de potasio.*

Aunque más costoso que el cloro, el permanganato de potasio ha sido usado en sistemas por gravedad para reducción de Mn (II), sabores y olores. Lo que ayuda a disminuir los costos químicos es el uso frecuente del permanganato en combinación con el cloro. A diferencia del cloro, las reacciones del KMnO<sub>4</sub> con Mn (II) son rápidas y completas a pH = 6 – 9,0 (Knocke et al. 1987, Wong 1982), aun cuando el incremento del carbón orgánico requiere dosis mayores de KMnO<sub>4</sub> para lograr la oxidación del Mn(II). (Knocke, 1987), reportó que se da una disminución sustancial en la eficiencia de oxidación del Mn (II) a bajas temperaturas (5°C). El KMnO<sub>4</sub> también se utiliza en muchos sistemas de filtros a presión en conjunto con el tratamiento del manganeso con arena verde.

La ecuación estequiométrica que se lleva a cabo en la oxidación del manganeso con el agente oxidante antes descrito, así como las cantidades teóricas para oxidar 1mg/L de Mn (II), se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4. Oxidación del manganeso con permanganato de Potasio.**

REACCION	POTENCIAL DE OXIDACIÓN mg /mg Mn <sup>2+</sup>	SÓLIDOS* lb/lb(Kg/kg)Mn <sup>2+</sup>
$3Mn^{2+} + 2KMnO_4 + 2H_2O$ $\rightarrow 5MnO_{2(s)} + 4H^+ + 2K^+$	1,92	2,64

- Cantidad de sólido precipitado, basado en el peso del óxido de manganeso MnO<sub>2</sub>. Es altamente probable que la fracción del sólido este compuesta por hidróxido de óxido de manganeso MnOOH (manganita) y carbonato de manganeso MnCO<sub>3</sub>.

**Fuente:** Water Treatment Plant Design - fifth Edition.

### 2.3.3.2. *Oxidación del Manganeso (II) con hipoclorito de sodio.*

Se usa como cloro, hipoclorito de sodio o dióxido de cloro. El hipoclorito de sodio es usualmente el oxidante más conocido, por su relativo bajo costo y por la facilidad de manipulación, recientemente, se han desarrollado nuevas estrategias para la remoción de manganeso soluble. Se ha observado que la oxidación del manganeso es severamente inhibida a bajas temperaturas y condiciones de pH ácidas. Otro trabajo reciente mostró la importancia del dióxido de manganeso recubriendo el medio filtrante como un mecanismo eficiente para remoción de Mn (II) (Knocke et al. 1997) y la necesidad de una reacción autocatalítica sobre el medio de arena o antracita recubierto con óxido de manganeso durante la filtración (Wong et al. 1982).

Las ecuaciones estequiométricas que se llevan a cabo en la oxidación del manganeso con los agentes oxidantes antes descritos, así como las cantidades teóricas para oxidar 1mg/L de Mn (II), se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5. Oxidación del manganeso con Cloro.**

REACCION	POTENCIAL DE OXIDACIÓN mg /mg Mn <sup>2+</sup>	SOLIDOS* lb/lb(Kg/kg)Mn <sup>2+</sup>
NaOCl $Mn^{2+} + 2ClO_2 + 2H_2O \rightarrow MnO_{2(s)} + ClO_2 4H^+$	1,35	1,58
Cl <sub>2</sub> $Mn^{2+} + Cl_2 + 2H_2O \rightarrow MnO_{2(s)} + 2Cl^- + 2H^+$	1,29	1,58
ClO <sub>2</sub> $Mn^{2+} + 2ClO_2 + 2H_2O \rightarrow MnO_{2(s)} + 2ClO_2^- + 4H^+$	2,46	1,58

- Cantidad de sólido precipitado, basado en el peso del óxido de manganeso MnO<sub>2</sub>. Es altamente probable que la fracción del sólido este compuesta por hidróxido de óxido de manganeso MnOOH (manganita) y carbonato de manganeso MnCO<sub>3</sub>.

**Fuente:** Water Treatment Plant Design - fifth Edition.

### 2.3.3.3. Ozono

El ozono (O<sub>3</sub>) es un oxidante fuerte y ha sido efectivamente utilizado para remover hierro y manganeso, a menudo en conjunción con la remoción de compuestos que también generan sabor y olor. El hierro es casi eliminado instantáneamente, sin embargo, las concentraciones y tasas de administración varían debido a la alta reactividad del ozono y los radicales libres asociados.

La ecuación estequiométrica que se lleva a cabo en la oxidación del manganeso con ozono, así como las cantidades teóricas para oxidar 1mg/L de Mn (II), se muestra en la Tabla 6.

**Tabla 6. Oxidación del manganeso con Ozono.**

REACCION	POTENCIAL DE OXIDACIÓN mg /mg Mn <sup>2+</sup>	SOLIDOS* lb/lb(Kg/kg)Mn <sup>2+</sup>
$Mn^{2+} + O_3 + H_2O \rightarrow MnO_{2(s)} + O_2 + 2H^+$	2,1	1,58

- Cantidad de sólido precipitado, basado en el peso del óxido de manganeso MnO<sub>2</sub>. Es altamente probable que la fracción del sólido este compuesta por hidróxido de óxido de manganeso MnOOH (manganita) y carbonato de manganeso MnCO<sub>3</sub>.

**Fuente:** Water Treatment Plant Design - fifth Edition.

#### 2.3.3.4. Oxidación con Peróxido de Hidrógeno.

La oxidación de manganeso Mn con peróxido de hidrógeno H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> no es un método muy común, puesto que se ha evidenciado que no se obtiene buenos resultados y la oxidación es demasiado lenta. La Tabla 7, compara la capacidad de oxidación de diferentes agentes oxidantes.

**Tabla 7. Comparacion de los potenciales de oxidación.**

<b>OXIDANTE</b>	<b>POTENCIAL DE OXIDACIÓN, V</b>
Ozono	2,1
Peróxido de Hidrogeno	1,92
Permanganato de Potasio	1,7
Dióxido de Cloro	2,46
Cloro	1,29

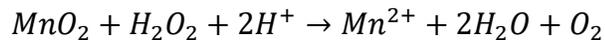
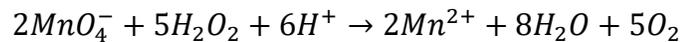
Tal y como se evidencia en la Tabla 7, el peróxido de hidrógeno tiene más potencial que el cloro y el permanganato, además con catálisis, el peróxido de hidrógeno se puede convertir en radical oxhidrilo.

El pH tiene un fuerte efecto sobre la química y la efectividad del peróxido de hidrógeno, el pH impacta la solubilidad y reactividad del catalizador hacia el peróxido de hidrógeno, las aplicaciones de peróxido incluyen la inyección de ácidos o álcalis para modificar el pH a un rango óptimo, el cual debe oscilar entre 9 a 11 unidades.

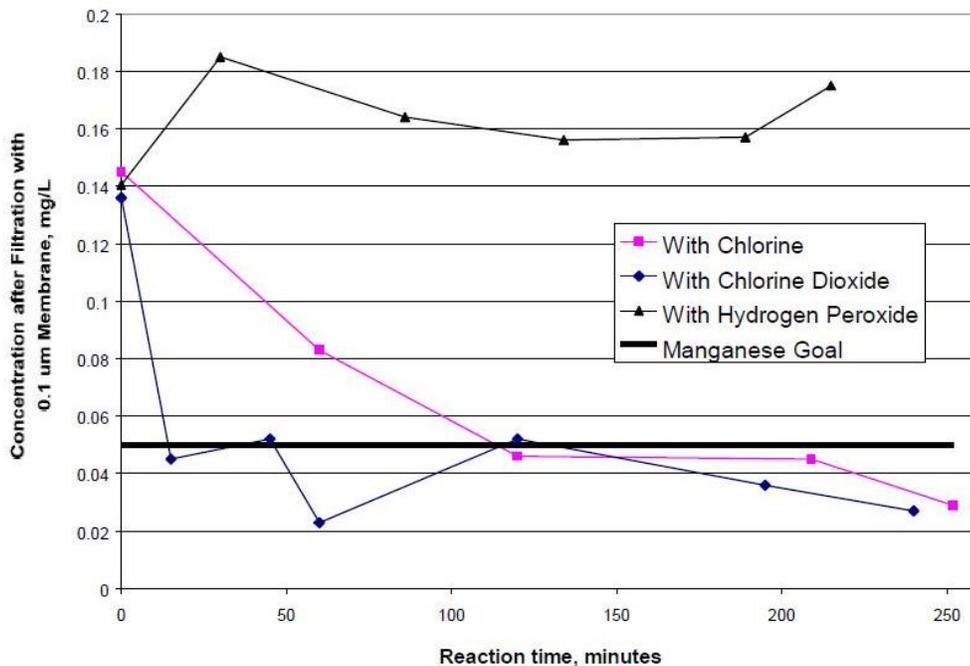
Los iones Mn, se oxidan fácilmente a óxido de manganeso  $MnO_2$  mediante peróxido de hidrógeno en condiciones alcalinas



La regla general para los compuestos de manganeso que reaccionan con peróxido de hidrógeno en condiciones ácidas es que la oxidación genera compuestos de Mn (II), por tanto, no se descompone o precipita con facilidad, mientras que en condiciones alcalinas con la aplicación de peróxido de hidrógeno se forma compuestos de MnO<sub>2</sub>, los cuales son más fáciles de remover, tal y como se muestra en las siguientes ecuaciones:



Según los resultados obtenidos en el documento denominado “¿se puede usar peróxido de hidrógeno para eliminar el manganeso y el hierro del agua de pozo?”, el estudio encontró que realizando ensayos a diferentes valores del pH el peróxido de hidrogeno no es un buen agente oxidante para manganeso, tal y como se muestra en la Gráfica 1, donde se presentan los resultados de eliminación de manganeso utilizando diferentes agentes oxidantes.



**Gráfica 1. Resultados de remoción de manganeso con diferentes agentes oxidantes.**

**Fuente:** <https://www.cleanwaterstore.com/blog/can-hydrogen-peroxide-be-used-to-remove-manganese-and-iron-from-well-water/>. Publicación de mayo 3 de 2015.

Los otros dos agentes utilizados en el estudio fueron el dióxido de cloro y el cloro gaseoso, los cuales mostraron mejor remoción del manganeso, donde el  $\text{Cl}_2$  llegó a los valores de Mn permitidos por la normatividad en 120 minutos y el  $\text{ClO}_2$  obtuvo el resultado esperado en 15 minutos, pero se presentan grandes cambios con las variaciones de pH.

En conclusión, no hubo remoción de manganeso al usar peróxido de hidrógeno, puesto que no se generó la reacción de oxidación y creó grandes complicaciones con el cloro utilizado para la desinfección.

#### **2.3.4. Filtración en medios acondicionados.**

Los medios filtrantes acondicionados para remover hierro y manganeso son de naturaleza similar, y su capacidad de regeneración, adsorción y filtración depende de la distribución de tamaño de partícula, de su forma y de los precipitados de óxidos de manganeso [MnO<sub>2</sub>] en su superficie. Normalmente se utiliza permanganato de potasio (KMnO<sub>4</sub>) como agente oxidante, siendo éste de costo elevado y requiere de un estricto control en su aplicación debido a su toxicidad (Sommerfeld., 1999).

#### **2.3.5. Filtración directa con la aplicación de sustancias químicas.**

Si el Fe y Mn una vez oxidados presentan tamaños muy pequeños que no se retienen en los medios granulares de los filtros se requiere de la aplicación de sustancias químicas (coagulantes y floculantes) para aglomerar las partículas oxidadas y formar flóculos lo suficientemente grandes para ser filtrados (Sommerfeld., 1999). Los medios filtrantes granulares deben retener sólidos suspendidos (incluyendo el Fe y Mn oxidados) con tamaño mayor a 10 mm. Un lecho filtrante diseñado adecuadamente y operando en condiciones óptimas es

capaz de remover la mayoría de las partículas con tamaños de 5 a 10 mm. Las partículas menores a 5 mm normalmente pasan a través del filtro dando como resultado concentraciones residuales de Fe y Mn en el agua filtrada.

El ablandamiento se aplica para eliminar la dureza del agua, donde la remoción del Fe y Mn es un efecto secundario. Dicho proceso consiste en elevar el pH del agua para precipitar al calcio y magnesio, originando que se oxide el Fe y Mn y coprecipiten con los carbonatos (a valores de pH mayores de 11). Este método no es muy eficiente, ya que se forman precipitados de manganeso de tamaño coloidal que pasan a través de los filtros cuando no se agregan coagulantes (Sommerfeld., 1999).

#### **2.3.6. Estabilización por secuestro.**

Los agentes secuestrantes son productos químicos utilizados para evitar que se precipiten los metales. Normalmente, tanto el silicato de sodio como los polifosfatos se utilizan para secuestrar Fe y los polifosfatos para secuestrar Mn. Muchos polifosfatos modernos tienen una larga cadena lineal de fosfatos; el arreglo de las moléculas a lo largo de la cadena protege de ataques al material secuestrado y los sujetan durante cierto periodo de tiempo o hasta que algún otro factor rompa los enlaces. Los agentes secuestrantes no remueven al Fe y Mn, solo evitan que precipiten y se recomienda su aplicación sólo para sistemas pequeños y concentraciones menores 0.5 mg/L.

### **2.3.7. Métodos biológicos.**

El hierro y manganeso también pueden ser removidos biológicamente. Los tratamientos biológicos siempre requieren de calidades y condiciones específicas del agua cruda, y no todas las aguas subterráneas o superficiales son factibles económicamente de ser tratadas. Los tratamientos biológicos pueden emplearse cuando los costos de inversión y operación son menores que los de un proceso físico-químico (Sommerfeld., 1999).

### **2.3.8. Remoción in-situ.**

La remoción in-situ consiste en la remoción de Fe y Mn directamente en el manto acuífero para obtener un agua de buena calidad. Este proceso es relativamente nuevo y solo existen algunas instalaciones en operación en Europa y en los Estados Unidos. Consiste en disolver oxígeno atmosférico en el agua que se utiliza para la recarga del acuífero, para posteriormente ser inyectada. El agua de recarga rica en oxidante (oxígeno) causa que el Fe y Mn formen una superficie de óxidos hidratados alrededor del acuífero, creando una zona de tratamiento. Cuando se termina la recarga, el agua subterránea rica en Fe y Mn pasa a través de esta zona por efecto de la extracción por bombeo. Las superficies de óxidos hidratados adsorben los iones de Fe y Mn, reduciendo las concentraciones de Fe y Mn disueltos. Cuando la zona de tratamiento se agota (se pierde la capacidad de adsorción de Fe y Mn), se reactiva nuevamente, inyectando agua oxigenada de recarga. Los ciclos de recarga y

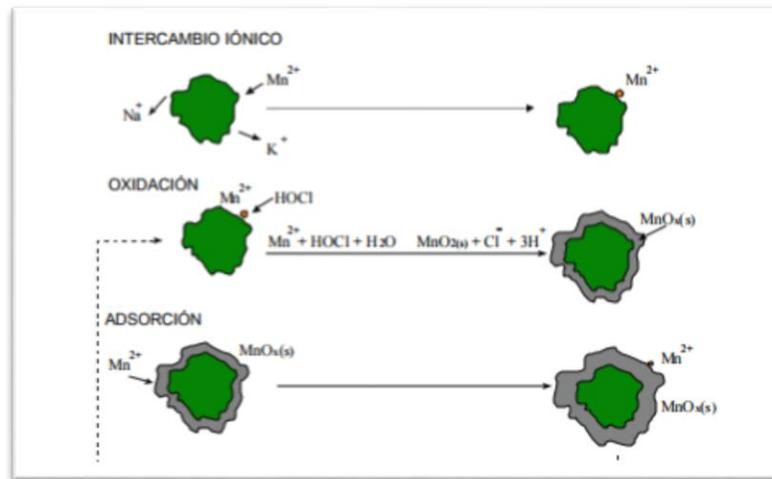
extracción se repiten cuantas veces sea necesario. La duración de los ciclos está en función del agua extraída antes de que los niveles de Fe y Mn rebasen las concentraciones deseadas. (Sommerfeld., 1999).

### **2.3.9. Intercambio iónico.**

Este proceso por lo general se aplica para la remoción de la dureza, utilizando resinas sintéticas operando a ciclo de sodio ( $\text{Na}^+$ ). La resina intercambia el sodio por iones  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Co}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Mn}^{+2}$  presentes en el agua; como resultado de este proceso se incrementa la concentración de sodio en el agua tratada. Una desventaja de este proceso son los precipitados cálcicos formados en presencia de oxígeno que bloquean los sitios de intercambio iónico, causando la saturación de la resina. Este proceso no se recomienda para la remoción de Fe y Mn ya que existe una mayor selectividad para el calcio y otros iones de mayor valencia.

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) ha desarrollado una tecnología para remoción de hierro y manganeso disueltos, la cual se basa en la adsorción del manganeso disuelto sobre zeolita natural tipo clinoptilolita recubierta con óxidos de manganeso. La técnica propuesta para la remoción de hierro y manganeso consiste en la combinación de tres procesos que se llevan a cabo en un simple sistema de filtración: 1) intercambio iónico como fase inicial, donde el manganeso disuelto se fija en la superficie de la zeolita, 2) la posterior oxidación del manganeso sobre la superficie del medio, la cual permite

la formación de una película de óxidos ( $MnOx(s)$ ) sobre el grano del material y  
 3) la remoción del manganeso disuelto en el agua, por adsorción sobre la película de óxidos formada sobre el grano del material. La Figura 6 ilustra este proceso.



**Figura 6. Etapas del proceso de formación de capa de óxidos de manganeso.**

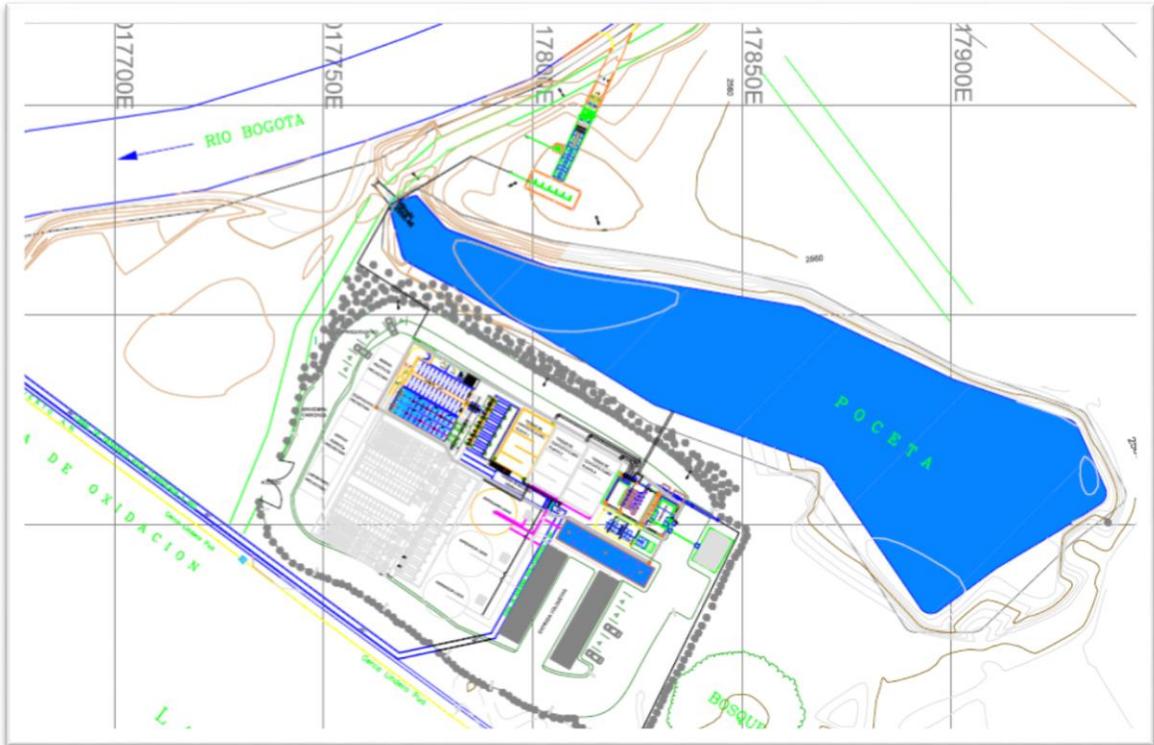
#### **2.4. SISTEMA CONVENCIONAL DE POTABILIZACION DE AGUA MUNICIPIO DE TOCANCIPÁ – CUNDINAMARCA.**

El caudal de diseño inicial de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Tocancipá es de 300 l/s, pero la construcción se planteó en tres etapas con tres módulos idénticos de operación en paralelo, cada uno con capacidad de 100 litros por segundo, en la actualidad solo se encuentra construido uno de los módulos, pero algunas de las estructuras fueron diseñadas para los 300 l/s, tales como la captación y el bombeo a cabeza de proceso, conducción y el tanque y sistema de bombeo de agua tratada, el cual alimenta un tanque alto de almacenamiento.

El sistema autónomo de tratamiento de agua potable del municipio de Tocancipá denominado PTAP Los Patos, se abastece del río Bogotá, es conformado por un tratamiento tipo convencional, el cual consta de los siguientes componentes y unidades de tratamiento:

- 1 canal de llegada, para una capacidad de 300 l/s.
- 1 canaleta Parshall de 12", para el aforo y mezcla rápida hasta 300 l/s.
- 2 floculadores con equipos mecánicos para 50 l/s cada uno, de flujo horizontal.
- 1 sedimentador de alta tasa de 100l/s.
- 1 batería de 6 filtros, con capacidad de 16,6 l/s cada uno.
- 1 tanque de desinfección y de contacto de cloro para 100 lps.
- 1 estación de bombeo para agua tratada, para 300 lps, pero con bombas instaladas para 100 lps.
- 1 canal de balance hidráulico para 300 lps, pero con bombas instaladas para 100 lps.
- 1 tanque espesador de lodos de 100 l/s.
- 7 celdas de lechos para el secado de los lodos, para 100 L.
- 1 cuarto de cloración para dosificación de cloro gaseoso, para 300 lps.
- 1 cuarto para laboratorio.
- 1 bodega de insumos químicos
- 1 cuarto de equipos eléctricos (subestación eléctrica y tableros de control).

- 1 cuarto para el grupo electrógeno de 400 kVA.



**Figura 7. Ubicación del sistema de tratamiento de agua potable.**

Fuente: Empresa de Servicios Públicos de Tocancipá S.A.ESP.

A continuación, se muestra un esquema del sistema convencional de tratamiento de agua potable.

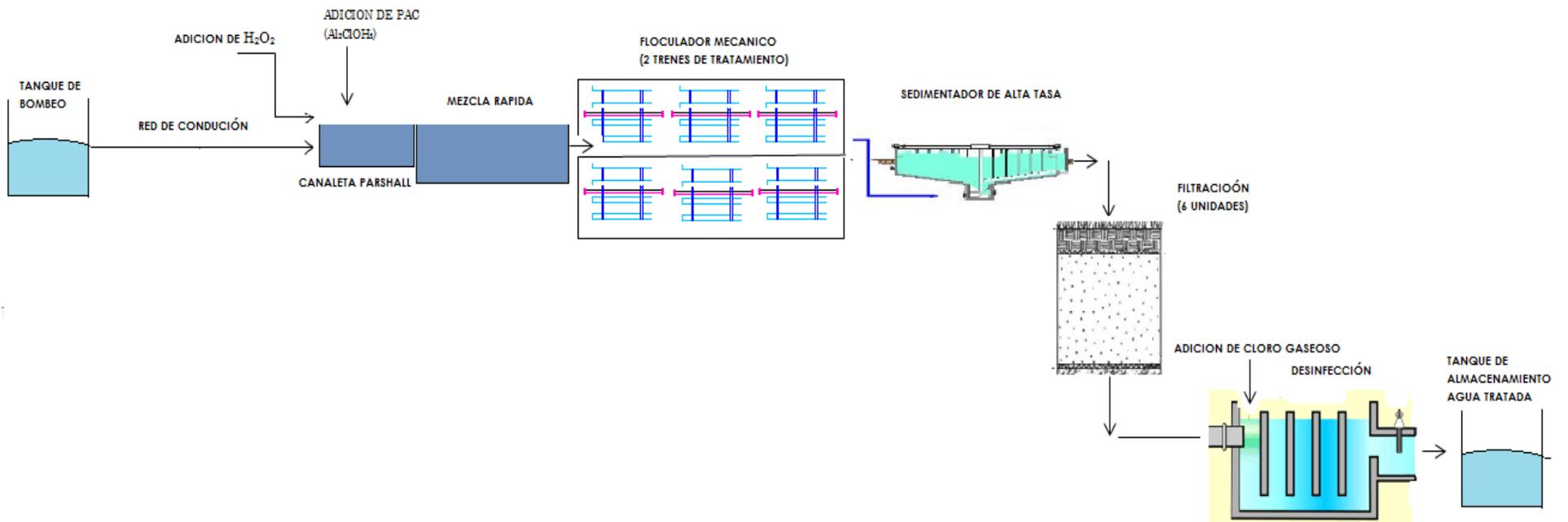


Figura 8. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento de agua potable Los Patos.

### 2.4.1. Captación

El agua cruda se capta en la bocatoma (situada en la margen izquierda del río Bogotá), por 2 compuertas y 2 tuberías en concreto pasando posteriormente por un canal, con reja para la remoción de sólidos. Seguidamente el agua pasa a un pozo de bombeo que cuenta con 2 bombas sumergibles de 50 lps, de 20 HP c/u; éstas bombean el agua cruda a la PTAP. En la línea de impulsión hay 2 separadores hidro-ciclónicos, para separación de arenas.



**Fotografía 1. Bocatoma PTAP Los Patos**

La regulación de caudal en la bocatoma se hace mediante compuertas.

### 2.4.2. Aducción.

La tubería de impulsión es de  $\Phi 16''$  en acero al carbono, ingresa al canal de llegada y pasa por una cascada donde se regula la presión y a la vez se airea, luego pasa a la canaleta Parshall de 12'', donde se afora y se mezcla el agua con los productos químicos (coagulantes y oxidante).

Se cuenta con dos bombas sumergibles las cuales bombean 50 lps, cada una; el tanque debe conservar un buen nivel para facilitar el bombeo constantemente y evitar que las bombas sufran daños. Para el tratamiento se puede trabajar con una bomba, lo que quiere decir, con un caudal mínimo de 50 lps y un máximo de 100 lps, con las dos bombas



**Fotografía 2.** Sistema de bombeo PTAP Los Patos

### **2.4.3. Desarenador.**

Su propósito es reducir el volumen de sólidos que ingresan a la planta, eliminar interferencias en los procesos y operaciones siguientes y evitar daños u obstrucciones en tuberías y equipos. Con la desarenación puede bajar la turbiedad del agua y así empieza la clarificación del agua.

La planta cuenta con desarenadores Lakos, los cuales eliminan sus sedimentos automáticamente. Según características de diseño, los desarenadores cuentan con una capacidad máxima de 120 lps.



**Fotografía 3.** Filtros Lakos.

### **2.4.4. Conducción.**

El agua cruda llega a la planta de tratamiento mediante tubería a presión de 16” pulgadas de diámetro.

#### **2.4.5. Coagulación.**

Es el primer proceso que se realiza en la planta de tratamiento, en él se produce la mezcla del coagulante con el agua para provocar que las partículas coloidalmente suspendidas en el agua, las cuales producen color, turbiedad y otros, puedan juntarse, aumentar su tamaño y peso para luego ser separadas del agua por medio de la sedimentación y filtración.

En el ingreso se encuentra la canaleta parshall de 12 pulgadas de garganta, que cumple la doble función de medidor de caudal y adicionalmente generador de mezcla rápida, al utilizar el resalto.



**Fotografía 4.** Canaleta Parshall

Los principales factores que influyen en el proceso son:

- Características del agua cruda: color, turbiedad, alcalinidad, pH, tamaño de las partículas y temperatura.
- Variables químicas: dosis óptima, pH óptimo, alcalinidad y concentración óptima del coagulante.

#### **2.4.6. Floculación**

El agua inicia su proceso de floculación en 2 cámaras paralelas, cada una con capacidad para 50 l/s, dotadas con agitadores mecánicos horizontales, para mantener el floc en suspensión y su adecuada formación. Cada tren de floculación cuenta con 4 cámaras, que se comunican entre sí a través de pantallas.

El objetivo principal de la floculación es reunir a las partículas desestabilizadas para formar partículas de mayor tamaño y peso que se llaman flóc.



**Fotografía 5.** Floculadores mecánicos

Dimensiones del floculador:

Longitud de la cámara: 3,5 m

Ancho de la cámara: 3,0 m

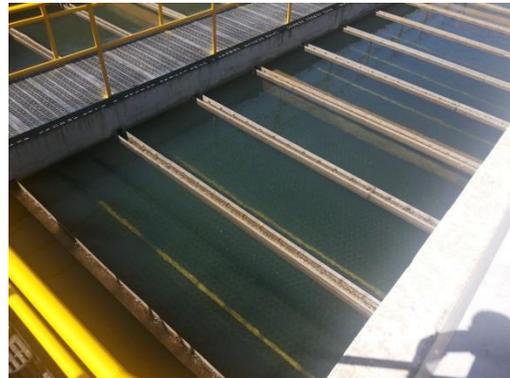
Altura de la lámina de agua: 3,0 m

Volumen útil de la cámara: 31,5 m<sup>3</sup>

Numero de cámaras por floculador 4

### 2.4.7. Sedimentación

El sedimentador cuenta con una tubería perforada de sección cuadrada (en acero inoxidable), que permite el ingreso al clarificador; el agua asciende a través de los módulos plásticos de alta tasa, tipo colmena (con sección hexagonal), y enseguida se recoge en canales transversales (en acero inoxidable), y enseguida se recoge en canales transversales (en acero inoxidable), que se acopia en un canal central (longitudinal), para llevar el agua clarificada hacia los filtros.



**Fotografía 6.** Sedimentadores

Dimensiones del sedimentador:

Longitud útil: 14,9 m

Ancho útil: 7,3 m

Altura total: 5,0 m.

Área útil: 108 m<sup>2</sup>

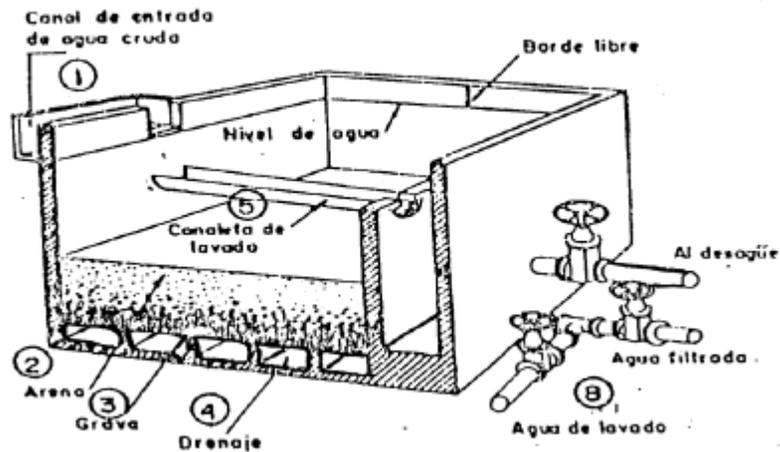
### 2.4.8. Filtración

La conducción del agua clarificada (sedimentada), desde el canal central que unifica el caudal (100 lps), se realiza a través de un canal elevado:

La planta cuenta con seis (6) unidades de filtración rápida, que tienen un lecho filtrante mixto capas de arena, grava y antracita, la filtración se realiza de forma descendente y el retro lavado es ascendente.



**Fotografía 7.** Filtro descendente



**Figura 9. Partes que componen filtro rápido**  
**Fuente:** Informe final puesta en marcha PTAP los Patos.

El filtro que aparece en la figura anterior, es un esquema del modelo construido en la planta de tratamiento, tiene retro lavado, el agua es inyectada por una tubería (punto 8) de forma ascendente haciendo que pase por la arena en sentido contrario a como se filtra. El agua para lavar de filtros proviene del clarificador o del tanque de agua tratada.

#### 2.4.9. Desinfección

En la planta de tratamiento Agua Potable de Tocancipá existe un clorador que aplican cloro gaseoso. Los componentes básicos del sistema de dosificación de cloro son:

- Bomba de agua.
- Válvulas y tuberías de conducción.
- Clorador.
- Eyector y difusor.
- Cilindro de cloro gaseoso.

La operación fundamental del sistema de dosificación se basa en suministrar la dosis de cloro que garantice cubrir la demanda de cloro del agua y tener un residual de cloro libre en cualquier punto de la red de distribución entre 0.3 y 2.0 mg/L, esto se realiza por medio del rotámetro del clorador que permitir graduación entre 10 y 100 kilogramos día.

La bomba de inyección de cloro al tanque de contacto, tiene las siguientes características:

- Caudal de operación = 4 gpm
- Cabeza dinámica total = 35 psi
- Potencia instalada = 0.5 Hp

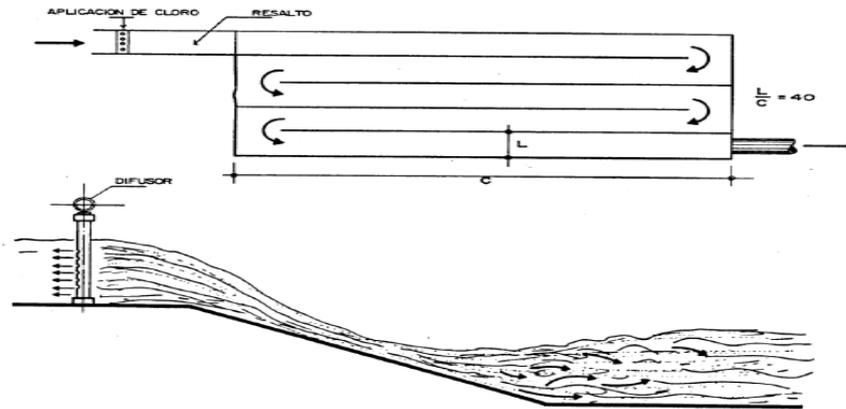


**Figura 10.** Clorador de la Planta Agua Potable de Tocancipá.

#### **2.4.10. Cámara de contacto.**

La cámara de contacto de cloro del sistema tiene un diseño hidráulico cuidadoso. El difusor de cloro se ubica al inicio de la cámara, seguido de un resalto hidráulico para promover una mezcla interna entre el cloro y el agua.

Posterior a la cloración el agua es conducida a la estación de bombeo para agua tratada, la cual cuenta con dos bombas de capacidad de 100 lps cada una, encargadas de enviarla al tanque de almacenamiento y distribución



**Figura 11. Tanque de contacto**

Las Dimensiones de la cámara de contacto o tanque de contacto:

Longitud útil: 14,1 m.

Ancho útil: 8,5 m.

Profundidad útil: 3,9 m.

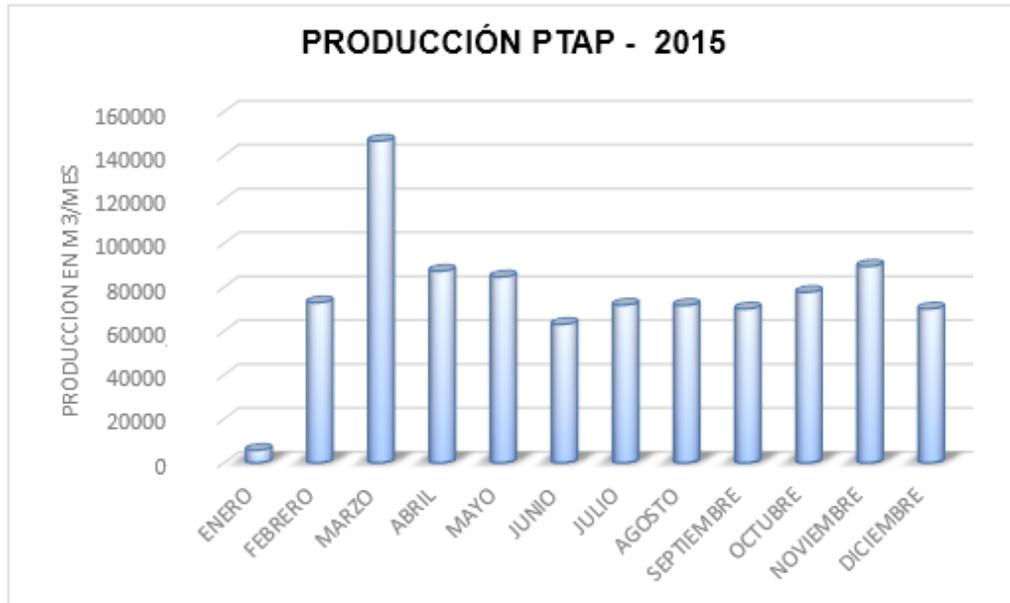
#### **2.4.11. Costos de tratamiento – Año 2015.**

En la Tabla 8, se presentan los datos de producción mensual de la PTAP Los Patos, la cual en promedio produce 82.319 m<sup>3</sup>/mes, a un costo promedio de 589 pesos/m<sup>3</sup>. Este promedio fue calculado sin tener en cuenta los datos de producción y costo del mes enero, ya que son valores atípicos que se dieron por una ruptura en la tubería de impulsión de agua tratada de la planta, lo cual mantuvo el sistema sin distribución, pero se requería realizar proceso para las pruebas de estanqueidad de la tubería de conducción, lo cual hace que se eleve el costo por metro cubico.

**Tabla 8. Costo por producción de agua mensual.**

<b>MES</b>	<b>PRODUCCION (m<sup>3</sup>)/mes</b>	<b>COSTO MENSUAL Pesos/(m<sup>3</sup>)</b>
<b>ENERO</b>	5.694	\$ 5,551
<b>FEBRERO</b>	72.951	\$ 637
<b>MARZO</b>	146.586	\$ 396
<b>ABRIL</b>	87.320	\$ 526
<b>MAYO</b>	84.664	\$ 493
<b>JUNIO</b>	63.068	\$ 750
<b>JULIO</b>	71.819	\$ 670
<b>AGOSTO</b>	71.690	\$ 691
<b>SEPTIEMBRE</b>	70.105	\$ 626
<b>OCTUBRE</b>	77.690	\$ 542
<b>NOVIEMBRE</b>	89.510	\$ 520
<b>DICIEMBRE</b>	70.111	\$ 627
<b>PROMEDIO</b>	82.319	\$ 589

**Gráfica 2. Datos de producción PTAP Los Patos – 2015**



## 2.5. MARCO NORMATIVO

Actualmente, autoridades ambientales de diferentes países han establecido los niveles máximos permitidos de la concentración del manganeso en el agua. Lo anterior con el fin de disminuir la exposición al elemento y los daños estéticos generados en el olor, color y sabor del agua.

La Directiva de Agua Potable de la Comisión Europea, encargada de regular aspectos relacionados al agua potable, establece que la concentración máxima permitida en el agua es de 0,05 mg/L (CEC Commission of European Communities, 1980). Este valor (0,05 mg/L) también es recomendado por Administración de Comida y Medicamentos de Estados Unidos para el agua

embotellada (Food and Drug Administration, 2015). Por otro lado, la Organización Mundial de la Salud (2006) fija dos valores. El primero está basado en los aspectos estéticos del agua, y es de 0,1 mg/L. Mientras que el segundo estándar se basa en los efectos en la salud, y es de 0.4 mg/L (Organización Mundial de la Salud, 2006).

A nivel nacional, se cuenta con lo establecido en el Decreto número 1575 de 2007, *“Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano”* se especifican las responsabilidades y funciones de las entidades encargadas de realizar la vigilancia, control y seguimiento y se determinan los instrumentos para llevar a cabo tal fin, adicionalmente se emitió la Resolución número 2115 de 2007, *“Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano”*, la cual en su artículo séptimo (7) las características químicas que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana, donde se determina un valor máximo permisible de manganeso en el agua potable de 0,1 mg/L, tal y como se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 9. Características Químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana.**

Elementos y compuestos químicos que tienen implicaciones de tipo económico	Expresadas como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Calcio	Ca	60
Alcalinidad Total	CaCO <sub>3</sub>	200
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	250
Aluminio	Al <sup>3+</sup>	0,2
Dureza Total	CaCO <sub>3</sub>	300
Hierro Total	Fe	0,3
Magnesio	Mg	36
Manganeso	Mn	0,1
Molibdeno	Mo	0,07
Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	250
Zinc	Zn	3
Fosfatos	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,5

También se cuenta con referentes normativos para otros usos en el decreto 1076 de 2015 (Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible) recopila transitoriamente el decreto 1594 de 1984, en el que el artículo 39 contiene los criterios de calidad de agua admisibles para agua de uso agrícola. Para el manganeso se establece una concentración máxima de 0,2 mg/L. El artículo 44 contiene los criterios de calidad de agua admisibles para la preservación de fauna y flora, para el manganeso este valor es de 0,1 mg/L.

En la cuenca del río Bogotá, el Acuerdo 43 de 2006 realizado por la CAR expresa que la concentración máxima permitida para el agua de Clase 1 (agua para consumo humano y doméstico con tratamiento convencional, preservación de fauna y flora, uso agrícola y uso pecuario) es de 0.1 mg/L. Mientras tanto, para la clase 4 (aguas para uso agrícola con restricciones y para uso pecuario)

el valor es de 0,2 mg/L (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2006).

## **CAPITULO III**

### **3.1. PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE TOCANCIPÁ.**

La planta de tratamiento de agua potable del municipio de Tocancipá es un sistema convencional con capacidad para tratar 100 l/s.

La evaluación hidráulica de los componentes del sistema se realizará de conformidad a lo establecido en la norma técnica RAS 2000, puesto que tal y como lo indica el artículo 257 de la resolución 330 de 2017, esta última aplica para sistemas nuevos, ampliaciones y optimizaciones, para efectos de diagnóstico de sistemas existentes se deberán evaluar los parámetros y criterios de diseño con la reglamentación con la cual fueron concebidos o proyectados.

#### **3.1.1. Mezcla Rápida.**

En la Tabla 10, se presentan los resultados de la evaluación de los parámetros de Velocidad de la garganta, tiempo de mezcla y gradiente de velocidad, evidenciando que el único parámetro que cumple con lo establecido en la norma técnica RAS 2000 es el gradiente de velocidad, los dos parámetros que están fuera de los rangos recomendados pueden indicar que la estructura está

sobredimensionada y que la mezcla rápida no se está realizando de una forma eficiente y homogénea.

**Tabla 10. Parámetros de Operación de la Canaleta Parshall.**

<b>CANALETA PARSHALL</b>			
<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR</b>	<b>PARAMETROS DE DISEÑO (RAS 2000)</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Caudal de diseño (m <sup>3</sup> /s) (Q)	0,1		
Gradiente de velocidad (G)	1.670 s <sup>-1</sup>	500 - 2000 s <sup>-1</sup>	Cumple
Velocidad de la Garganta m/s (v)	1,75	>2	No Cumple
Tiempo de Mezcla ( $\theta$ ) (s)	0,27	1-5 (s)	No Cumple

### **3.1.2. Floculador Mecánico.**

En la Tabla 11, se presentan los resultados de velocidad, gradiente de velocidad, tiempo de retención y área de la sección transversal de los dos floculadores. Se puede observar que el floculador cumple con los valores por parámetro evaluado y las recomendaciones de la norma técnica RAS 2000, salvo el tiempo de retención, con una diferencia de 2 minutos que favorece el proceso.

**Tabla 11. Parametros de Operación de los Floculadores.**

<b>Floculador Mecánico</b>			
<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR</b>	<b>PARAMETROS DE DISEÑO (RAS 2000)</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Caudal de diseño (m <sup>3</sup> /s) (Q)	0,050		
Gradiente de velocidad (G)	30 s <sup>-1</sup>	15-75 s <sup>-1</sup>	Cumple
Velocidad m/s (v)	0,005	0,2 a 0,6 m/s	Cumple
Tiempo de Retención minutos (θ)	42	20 – 40 min	Cumple
Área de la sección Transversal de Flujo	9 m <sup>2</sup>		

### **3.1.3. Sedimentador de Alta Tasa.**

En la Tabla 12, se presentan los resultados de velocidad, área, tiempo de retención y carga superficial, donde se puede observar que hidráulicamente el sedimentador cumple con los parámetros de carga superficial y tiempo de retención recomendados por la norma técnica RAS 2000.

**Tabla 12. Parametros de Operación Sedimentador de Alta Tasa.**

<b>Sedimentador de Alta Tasa</b>			
<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR</b>	<b>PARAMETROS DE DISEÑO (RAS 2000)</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Q (m3/s)	0,1		
Área (m2)	108,77		
Velocidad Critica de Sedimentación (m/d)	11,4		
Altura de sedimentación (m)	5	4 m - 5.5 m.	Cumple
Tiempo de retención (min)	16,48	10 - 15 min.	Cumple
Carga Superficial (Cs) (m/día)	79,43	120 - 185 m <sup>3</sup> / (m <sup>2</sup> .día)	Cumple

### 3.1.4. Filtros.

En la Tabla 13, se presentan los resultados de la evaluación de los parámetros de operación de filtración. Se puede observar que los filtros operan con una tasa de filtración de 203 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-día, cumpliendo con los valores y las recomendaciones de la norma técnica RAS 2000.

**Tabla 13. Parametros de Operación de la Filtración.**

<b>Unidades de Filtración</b>			
<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR</b>	<b>PARAMETROS DE DISEÑO (RAS 2000)</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Q (l/s)	100		
Q (m3/s)	0,10		
Q. para cada filtro l/s	16,67		
Área de filtración por cada Filtro (m <sup>2</sup> ) (6 filtros)	7,07		
tasa de filtración m/día	203	< 300 m <sup>3</sup> / (m <sup>2</sup> -día),	Cumple

### 3.1.5. Tanque de Contacto de Cloro.

En la Tabla 14, se presentan los resultados de tiempo de retención y volumen de contacto. Se puede observar que el tiempo de contacto excede el valor recomendado por la norma técnica RAS 2000, es muy superior al requerido por la norma lo cual evidencia mayor capacidad de almacenamiento y de cloro gaseoso para la desinfección.

**Tabla 14. Parametros de Operación Tanque de Contacto de Cloro.**

<b>Tanque de Contacto de Cloro</b>			
<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR</b>	<b>PARAMETROS DE DISEÑO (RAS 2000)</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Tiempo de Contacto	77.9 min	> 20	Cumple
Caudal	100 L/s		
Volumen de contacto requerido	467,4 m <sup>3</sup>		
Altura de la lámina de agua	3.90 m		

## 3.2. MONITOREO DE MANGANESO EN LA PTAP.

### 3.2.1. Muestras.

La planta de tratamiento de agua potable del municipio de Tocancipá, operó hasta el año el año 2015, 16 horas diarias divididas en dos turnos de 8 horas, en condiciones normales de funcionamiento. Cuando se presentan valores altos de materia orgánica, cuantificados con el análisis de carbono orgánico total

COT y con incremento de concentraciones de manganeso, se establecen turnos para las 24 horas, porque no puede realizarse tratamiento continuo y se corre el riesgo de desabastecimiento.

Cada cuadrilla de operación cuenta con 2 operarios, los cuales deben realizar aforo y análisis de pH, alcalinidad, turbiedad, color, junto ensayo de jarras para determinar las dosis óptimas de productos químicos. En el año 2015, se utilizaba policloruro de aluminio (PAC) como coagulante y peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) como agente oxidante.

Cada cuadrilla de operación debe realizar muestreo y análisis a la entrada del sistema, a la salida del floculador, a la salida del sedimentador y a la salida del tanque de contacto de cloro cada hora, las muestras de parámetros especiales, tales como hierro (Fe), manganeso (Mn) y Carbono orgánico Total (COT), se realizan cada dos horas, excepto cuando las concentraciones de estos parámetros aumentan, se realiza monitoreo más frecuente cada hora.

### **3.2.2. Análisis.**

El método utilizado para la determinación de Manganeso total es el 3500-Mn del Standard Methods.

## **CAPITULO IV**

### **4.1. RESULTADOS**

Las características de la fuente de abastecimiento Rio Bogotá, son muy susceptibles al cambio, por las características dinámicas de la cuenca, puesto que aguas arriba de la bocatoma se declararon zonas industriales, se encuentran las descargas de aguas residuales de los municipios de Gachancipá, Suesca, Chocontá y Villapinzón, adicionalmente el rio en su cuenca alta recibe las descargas de las curtiembres, lo que la hace que sea una fuente muy difícil de tratar y requiere de un constante monitoreo, para evaluar el proceso de tratamiento.

Los resultados que se muestran en este capítulo, corresponden a los valores promedio mensuales donde se observan los meses de enero a diciembre del año 2015, en la fuente de abastecimiento y en las diferentes unidades de proceso del sistema de tratamiento.

Los puntos definidos para la toma de muestras se describen y numeran a continuación.

- **Punto No. 1** – Denominado en las tablas de datos como Agua Cruda, muestra tomada sobre el costado oriental de río Bogotá, donde está ubicada la bocatoma.
  
- **Punto No. 2** – Denominado en las tablas de datos como agua clarificada, muestra tomada en el efluente del sedimentador de alta tasa.
  
- **Punto No. 3** – Denominado en las tablas de datos como agua Filtrada, muestra tomada en el efluente de los filtros.
  
- **Punto No. 4** – Denominado en las tablas de datos como agua tratada, muestra tomada en el efluente del sistema de potabilización.

#### **4.1.1. Turbiedad.**

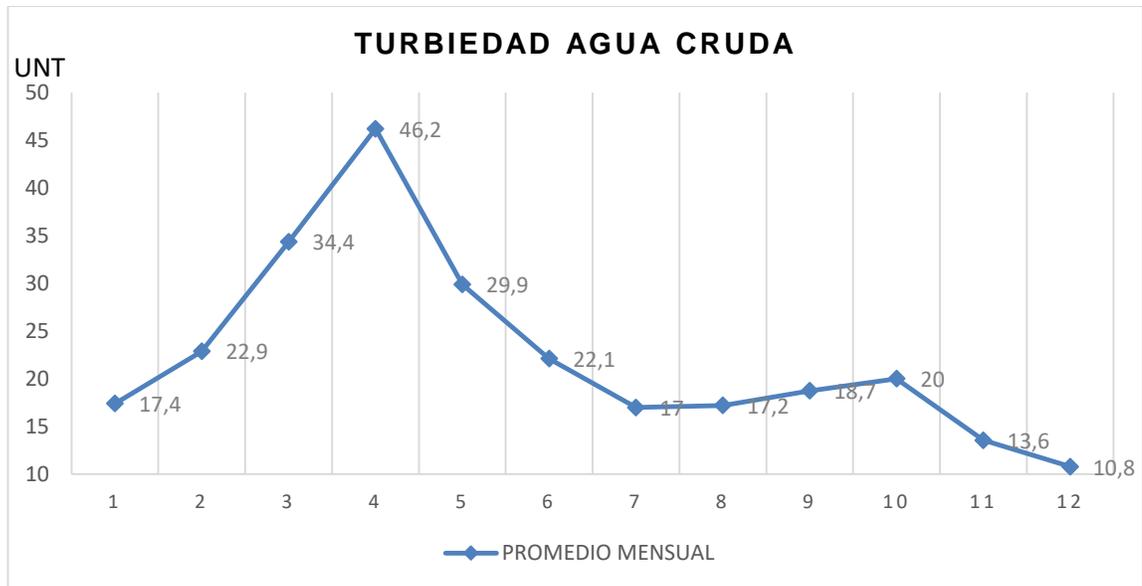
La turbiedad es una expresión de la propiedad o efecto óptico causados por la dispersión e interferencia de los rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua. La turbidez en un agua puede ser ocasionada por una gran variedad de materiales en suspensión que varían en tamaño, desde dispersiones coloidales hasta partículas gruesas entre otras arcillas, limos, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, organismos planctónicos y microorganismos. (ROMERO ROJAS, 2002).

En la Tabla 15, se presentan los resultados de turbiedad promedio mensual por punto de muestreo.

**Tabla 15. Promedio mensual de Turbiedad en los cuatro puntos de muestreo.**

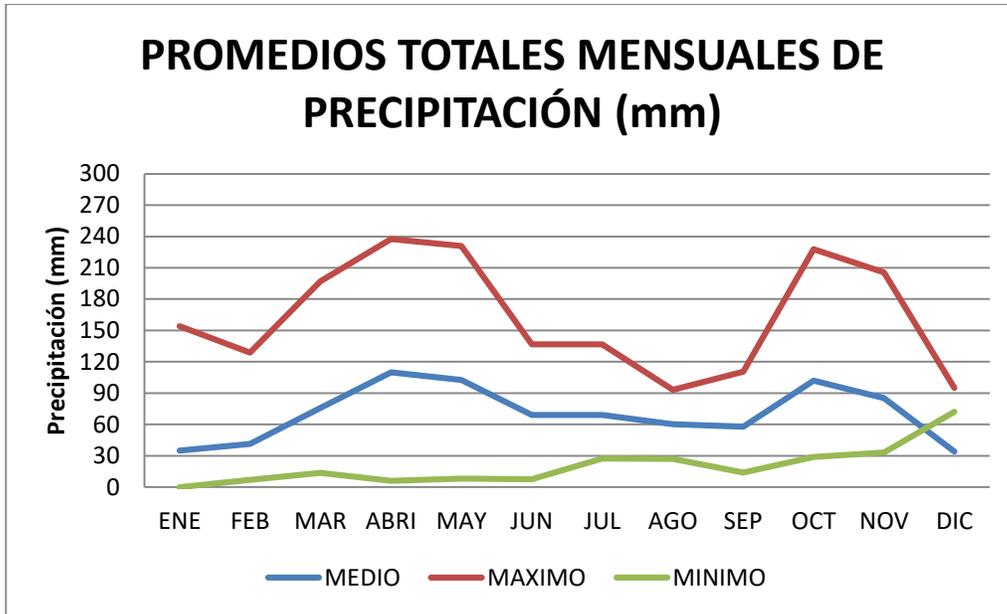
<b>TURBIEDAD (UNT)</b>				
<b>MES</b>	<b>AGUA CRUDA</b>	<b>AGUA CLARIFICADA</b>	<b>AGUA FILTRADA</b>	<b>AGUA TRATADA</b>
1. Enero	17.4	3	0.8	1.4
2. Febrero	22.8	12.5	4.8	2.4
3. Marzo	34.3	4	0.9	1
4. Abril	46.2	11.2	2.1	1.6
5. Mayo	29.8	8.2	2.3	1.9
6. Junio	22.1	5.8	1.4	2
7. Julio	16.9	4.3	1.2	1.7
8. Agosto	17.2	6	0.6	1.8
9. Septiembre	18.7	4.3	1.1	1.1
10. Octubre	20	11.4	4	2
11, Noviembre	13.5	4	1	1.6
12. Diciembre	10	2.5	0.8	1.1

Los datos presentados en la tabla anterior se grafican a continuación:

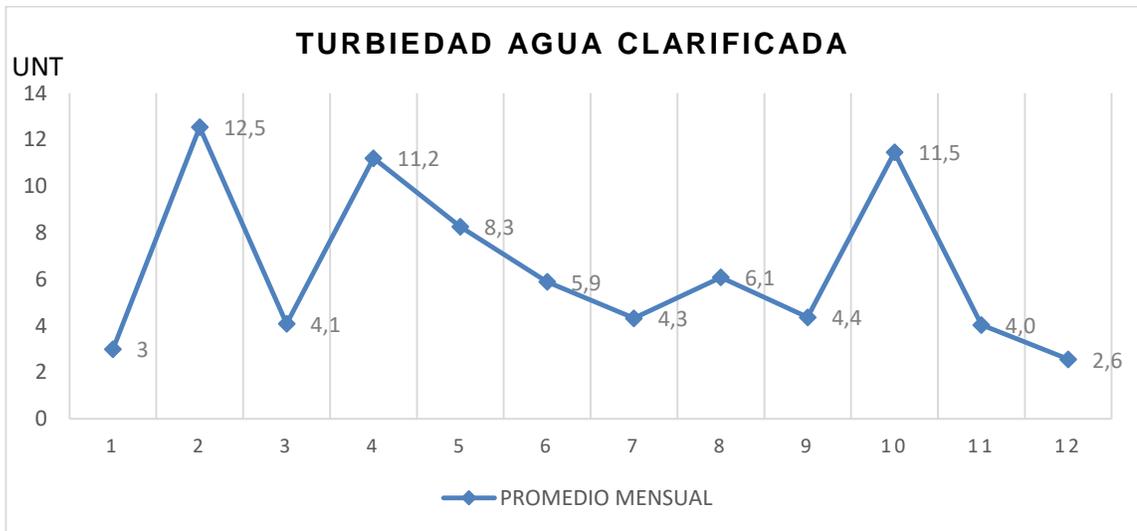


**Gráfica 3. Datos de turbiedad agua cruda.**

En la Gráfica 3, se puede observar un incremento en el valor promedio mensual de la turbiedad en los meses de marzo y abril, lo cual coincide con el incremento histórico de las precipitaciones en el municipio y en la cuenca alta del río Bogotá, que se da en estos meses, tal como se muestra en la Gráfica 4, de valores promedio de precipitación con datos históricos desde 1998, tomados de la estación: 21205850 El Colombiano, perteneciente al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), ubicada en el municipio de Sesquilé y la más cercana al municipio de Tocancipá. La turbiedad del agua cruda varía en un promedio mensual de 10 y 46 UNT.

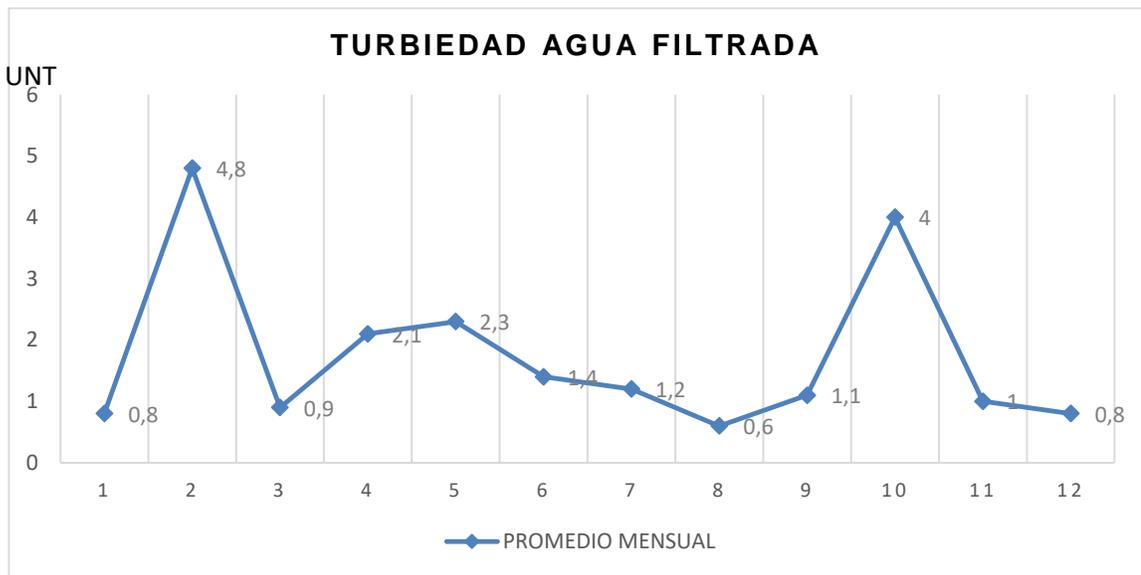


**Gráfica 4. Valores mínimos, medios y máximos de precipitación en la cuenca media del río Bogotá.**



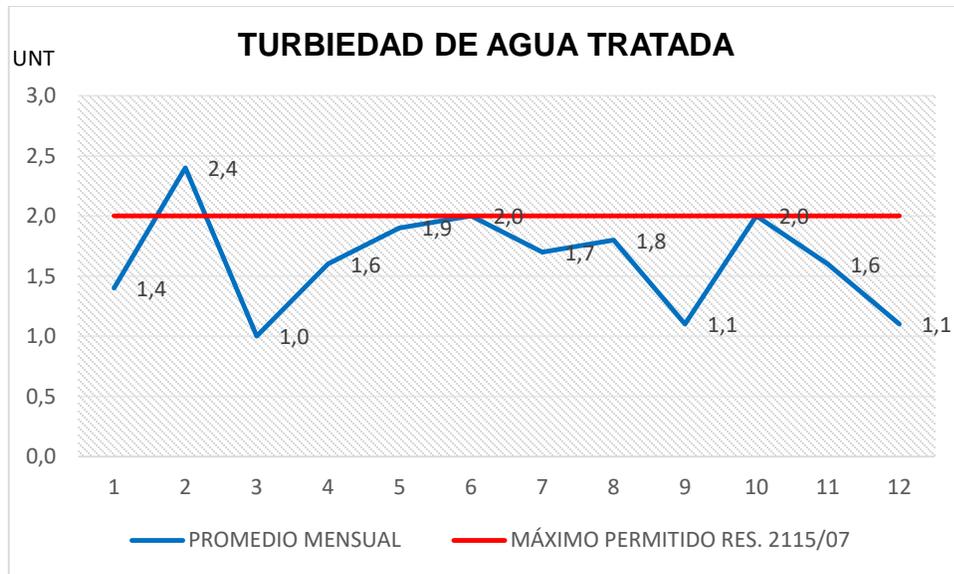
**Gráfica 5. Datos de turbiedad en el efluente del sedimentador.**

Tal y como se observa en la Gráfica 5, los valores promedio de turbiedad del agua clarificada fluctúan entre 2,5 y 12,5 UNT, debido a las variaciones de la calidad de agua de la fuente, los diferentes efectos de la coagulación y la floculación. Sin embargo, en todos los meses se observa remoción a valores inferiores de 12,5 UNT



**Gráfica 6. Datos de turbiedad en el efluente de los filtros.**

En el punto de muestreo No.3 – efluente de filtros se observa que los valores más altos de turbiedad en esta fase del tratamiento se presentan en los meses de febrero y octubre, que corresponden a los valores máximos del agua clarificada.



**Gráfica 7. Datos de turbiedad en el efluente de la planta de tratamiento.**

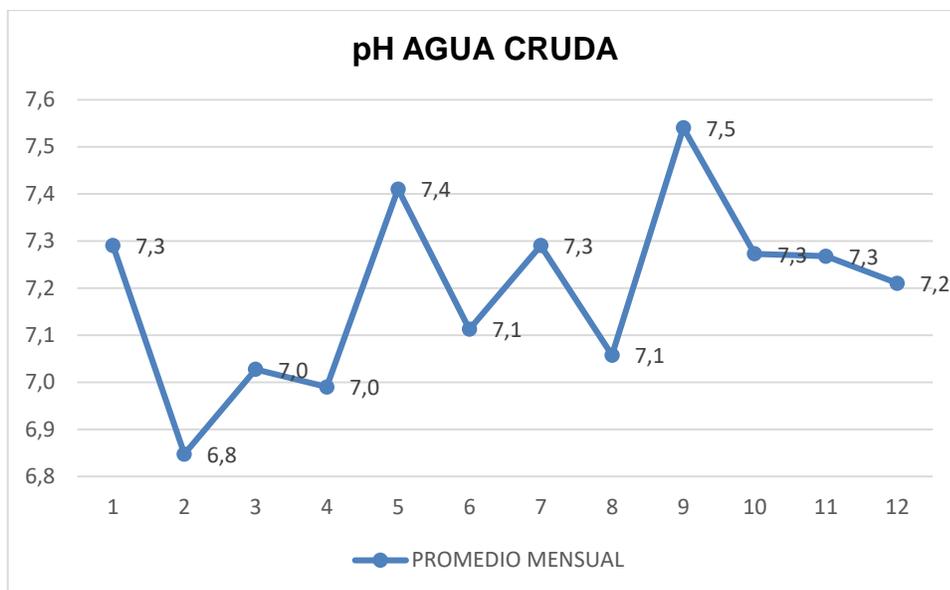
En la Gráfica 7, se presentan los valores de turbiedad promedio mensual del agua tratada. Se observa que el sistema tiene un alto porcentaje de remoción de turbiedad y que el agua tratada cumple con el valor máximo permisible para agua potable de 2 UNT, excepto durante el mes de febrero,

#### 4.1.2. pH.

**Tabla 16. Valores promedio mensuales de pH en los cuatro puntos de muestreo.**

pH				
MES	pH AGUA CRUDA	pH AGUA CLARIFICADA	pH AGUA FILTRADA	pH AGUA TRATADA
1	7,3	7,2	7,1	6,9
2	6,8	6,8	6,8	6,8
3	7,0	7,0	7,0	6,8
4	7,0	6,8	6,8	6,8
5	7,4	7,1	7,1	6,9
6	7,1	6,7	6,7	6,7
7	7,3	6,5	6,6	6,7
8	7,1	6,9	6,9	6,8
9	7,5	7,4	7,4	7,2
10	7,3	7,2	7,2	7,1
11	7,3	7,2	7,2	7,1
12	7,2	7,2	7,2	7,0

Como se observa en la Tabla 16, los valores de pH varían en un rango de 6.5 a 7.5 unidades en todos los cuatro (4) puntos de monitoreo, y cumple con el rango establecido en el artículo 4 de la resolución 2115 de 2007, para agua potable de 6,5 a 9,0.

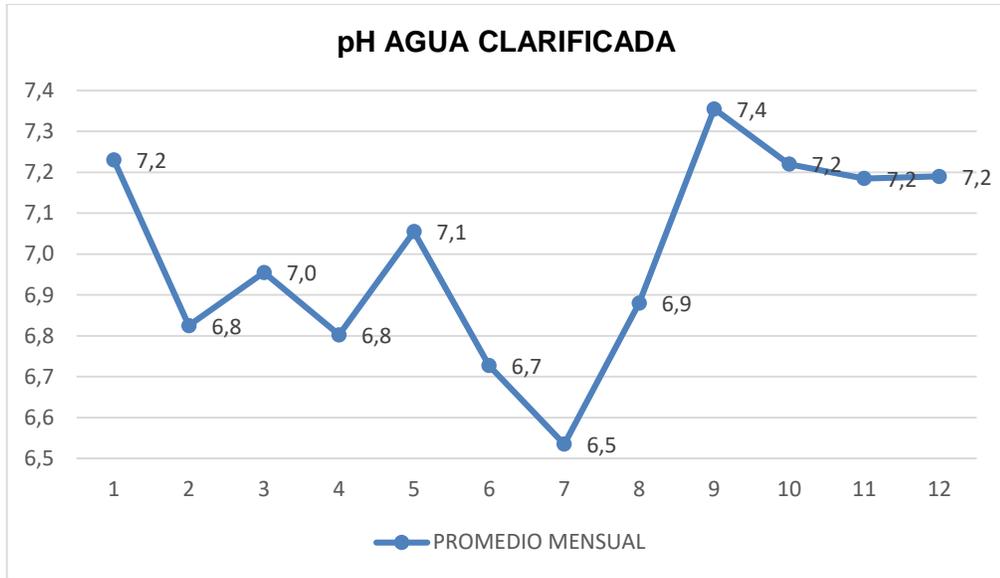


**Gráfica 8. Valores de pH en el afluente de la planta de tratamiento.**

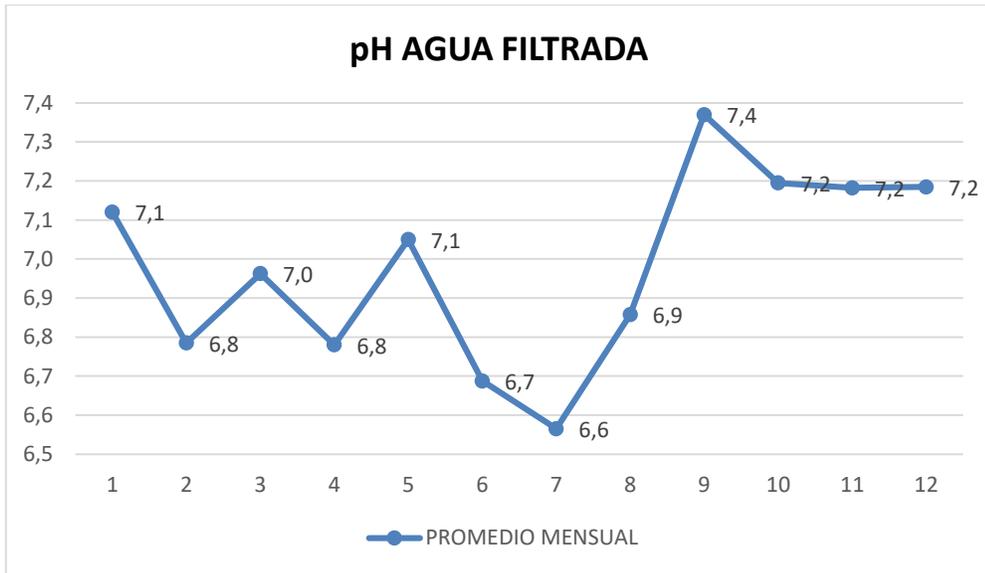
Como se observa en la Gráfica 78, el pH de la fuente de abastecimiento oscila entre 6,8 y 7,5.

En el agua clarificada el pH varía entre 6,5 y 7,4, lo que refleja el efecto de la coagulación.

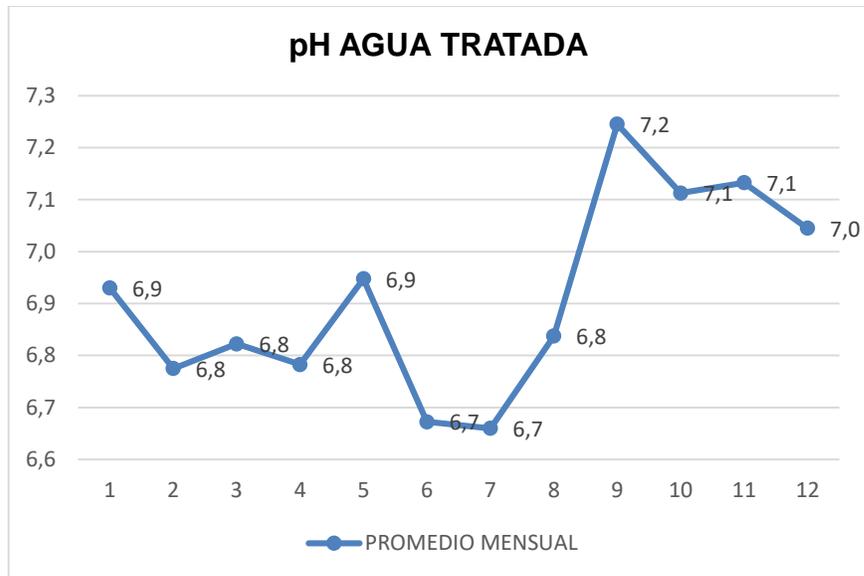
En el agua filtrada se mantiene el rango de pH del agua clarificada de 6,5 a 7,4 cumpliendo con los rangos de valores aptos para consumo humano.



**Gráfica 9. Valores de pH en el efluente del sedimentador.**



**Gráfica 10. Valores de pH agua filtrada.**



**Gráfica 11. Valores de pH en el efluente de la planta de tratamiento.**

Como se muestra en la Gráfica 7, los valores de pH del agua tratada, tomado en el punto No. 4 de muestreo oscilan entre 6,7 y 7,2, cumpliendo con el rango establecido para agua potable por la normatividad Colombiana.

#### **4.1.3. Alcalinidad.**

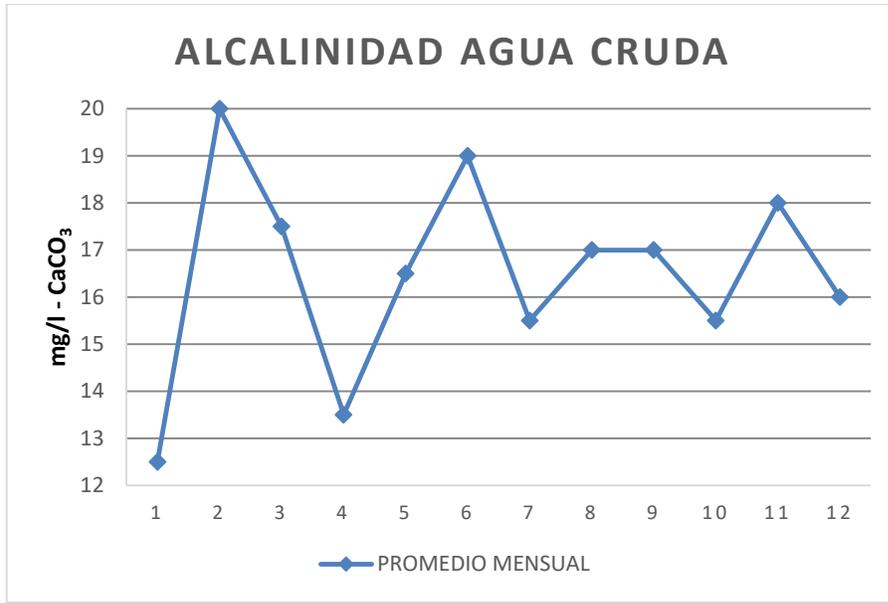
La alcalinidad del agua puede definirse como su capacidad para neutralizar ácidos, como su capacidad de reaccionar con iones hidrógeno, como su capacidad para aceptar protones o como la medida de contenido total de sustancias alcalinas ( $\text{OH}^-$ ). (ROMERO ROJAS, 2002). Se encuentra compuesta principalmente por la concentración de iones bicarbonatos, de carbonatos y de aniones hidroxilos. En la Tabla 17, se muestran los valores de alcalinidad promedio mensual para los puntos de muestreo.

**Tabla 17. Valores de alcalinidad promedio mensual en los cuatro puntos de muestreo.**

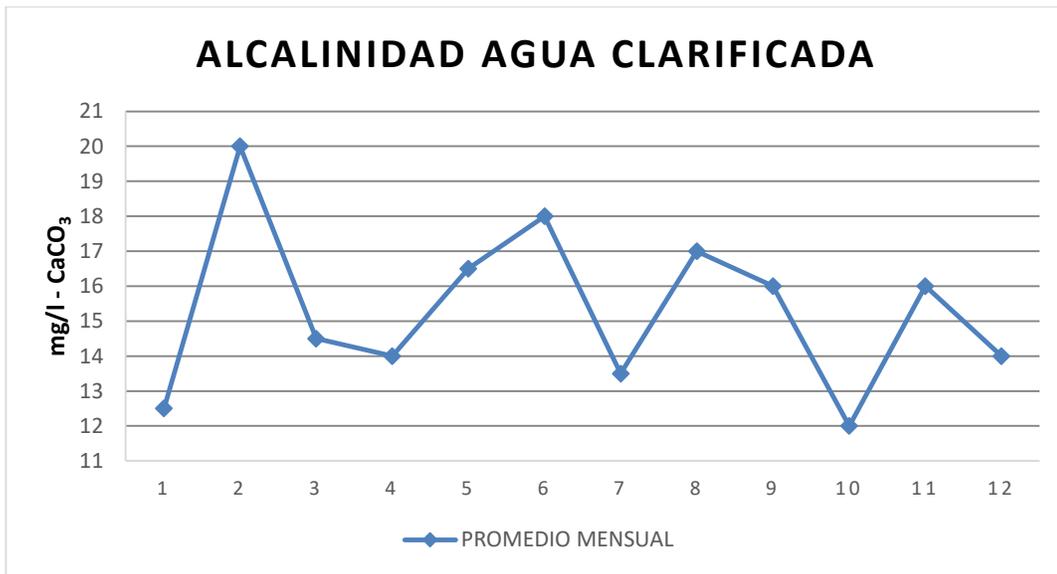
<b>ALCALINIDAD TOTAL (mg/l - CaCO<sub>3</sub>)</b>			
<b>MES</b>	<b>AGUA CRUDA</b>	<b>AGUA CLARIFICADA</b>	<b>AGUA TRATADA</b>
1	12,5	12,5	9
2	20	20	19
3	17,5	14,5	8.5
4	13,5	14	14.5
5	16,5	16,5	9.5
6	19	18	18
7	15,5	13,5	10.5
8	17	17	16
9	17	16	16
10	15,5	12	11
11	18	16	18
12	16	14	10

En las gráficas 10 a 12, se observan los valores de alcalinidad para los puntos de muestreo.

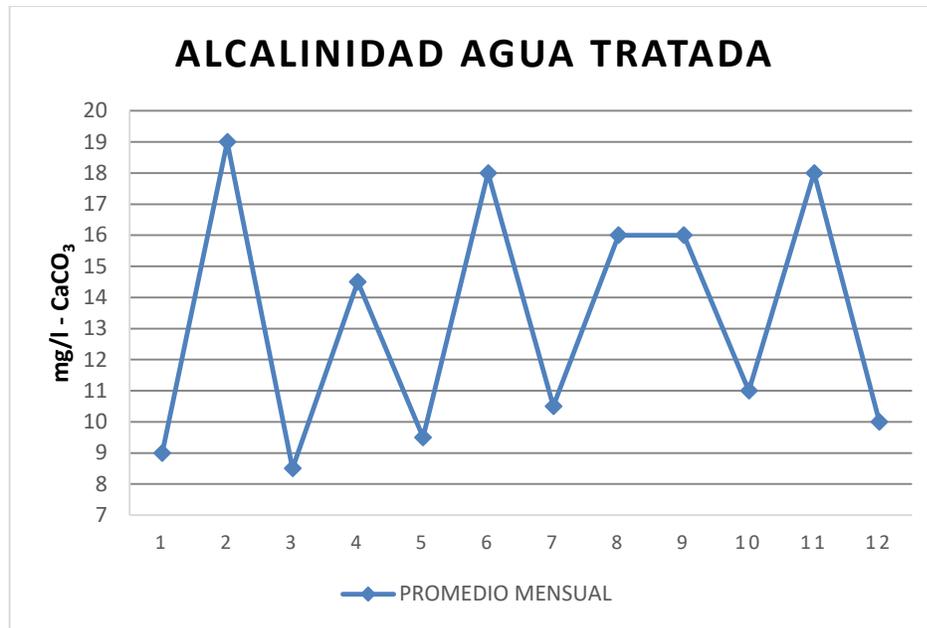
Se puede observar que el afluente de la PTAP, cuenta con una baja alcalinidad que oscila entre 13 y 20 mg/l, lo cual indica que el agua es de difícil coagulación.



**Gráfica 12. Alcalinidad en el afluente de la planta de tratamiento.**



**Gráfica 13. Alcalinidad en el efluente del sedimentador.**



**Gráfica 14. Alcalinidad en el efluente de la planta de tratamiento.**

La alcalinidad no varía de manera representativa en los procesos de tratamiento y se encuentran por debajo de los límites máximos permitidos por la resolución 2115 de 2007.

#### **4.1.4. Color.**

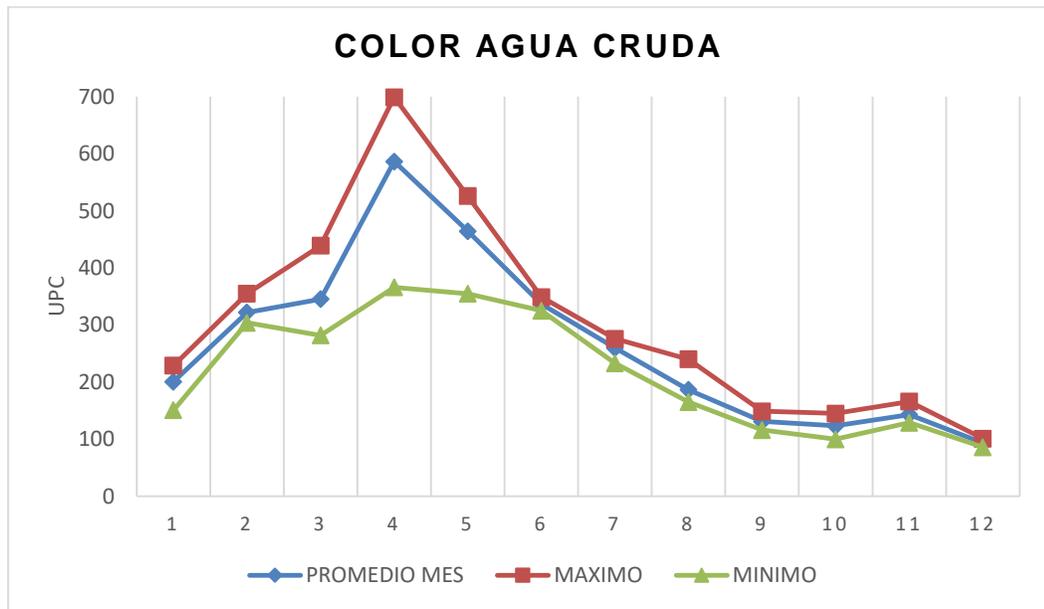
Las causas más comunes de color en el agua son la presencia de hierro y manganeso coloidal o en solución; el contacto del agua con desechos orgánicos, hojas, madera, raíces, etc., en diferentes estados de descomposición y la presencia de taninos, ácido húmico y algunos residuos industriales. El color natural en el agua existe principalmente por el efecto de partículas coloidales cargadas negativamente. (ROMERO ROJAS, 2002)

**Tabla 18. Valores de Color aparente promedio mensual en los cuatro puntos de muestreo.**

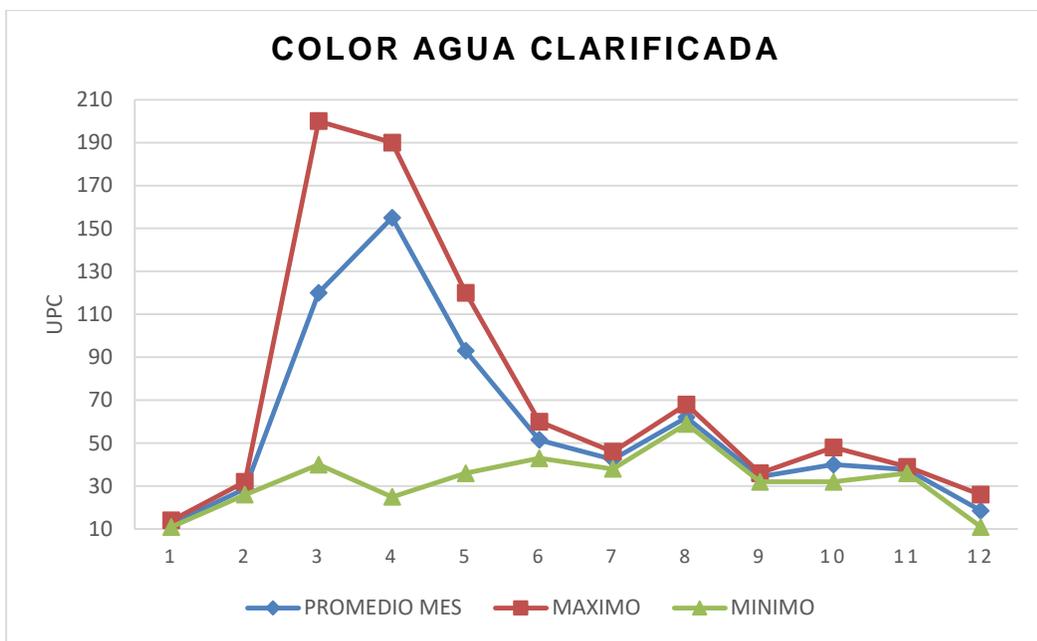
<b>COLOR (UPC)</b>										
<b>MES</b>	<b>AGUA CRUDA</b>			<b>AGUA CLARIFICADA</b>			<b>AGUA FILTRADA</b>			<b>AGUA TRATADA</b>
	<b>PROMEDIO</b>	<b>MAXIMO</b>	<b>MINIMO</b>	<b>PROMEDIO</b>	<b>MAXIMO</b>	<b>MINIMO</b>	<b>PROMEDIO</b>	<b>MAXIMO</b>	<b>MINIMO</b>	<b>PROMEDIO</b>
1	201	229	151	13	14	11	13	5	0	13
2	322	355	304	29	32	26	9	14	6	10
3	346	439	282	120	200	40	51	92	6	32
4	587	699	366	155	190	25	52	20	11	23
5	464	526	355	93	120	36	11	14	8	14
6	337	349	325	52	60	43	13	13	12	13
7	260	276	233	43	46	38	16	18	14	14
8	187	240	165	62	68	59	13	16	8	10
9	131	149	116	35	36	32	9	10	7	9
10	123	145	100	40	48	32	9	15	3	5
11	143	166	129	38	39	36	11	12	9	9
12	94	101	86	19	26	11	6	7	4	5

En la Tabla 18 y en las gráficas de la 15 a la 18, se presentan los valores de color aparente, en los cuatro puntos de muestreo. El color del agua de entrada oscila entre 86 y 699 UPC, con valores máximos en el mes de abril y mayo (Gráfica 15).

El color del agua clarificada varía entre 11 y 200 UPC, con valores máximos en el mes de mayo, como se muestra en la Gráfica 16, el valor del agua tratada cambia entre 0 y 92 UPC, con un valor máximo en el mes de mayo como se muestra en la Gráfica 17.

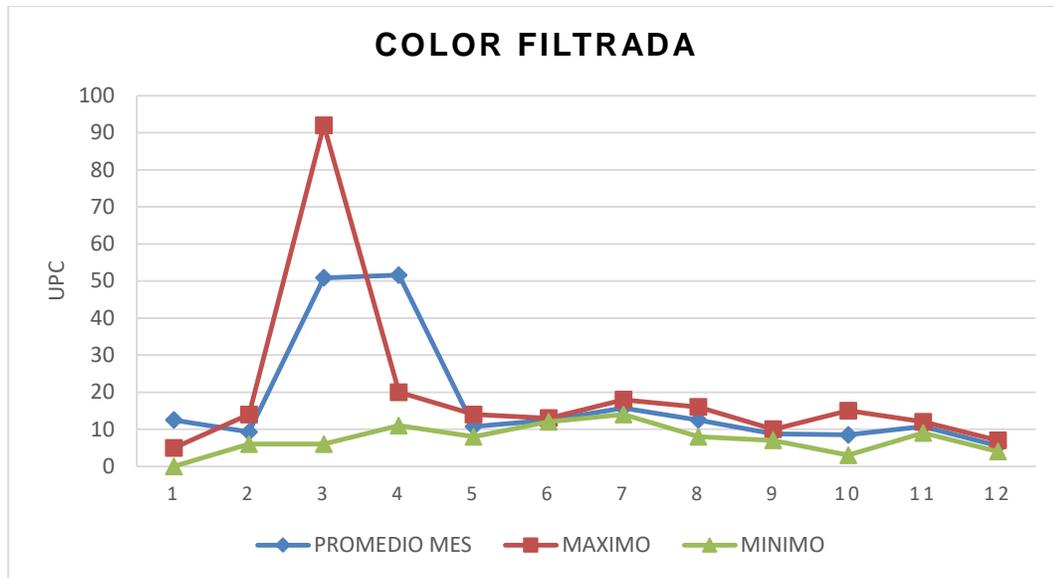


**Gráfica 15. Color en el afluyente de la planta de tratamiento.**



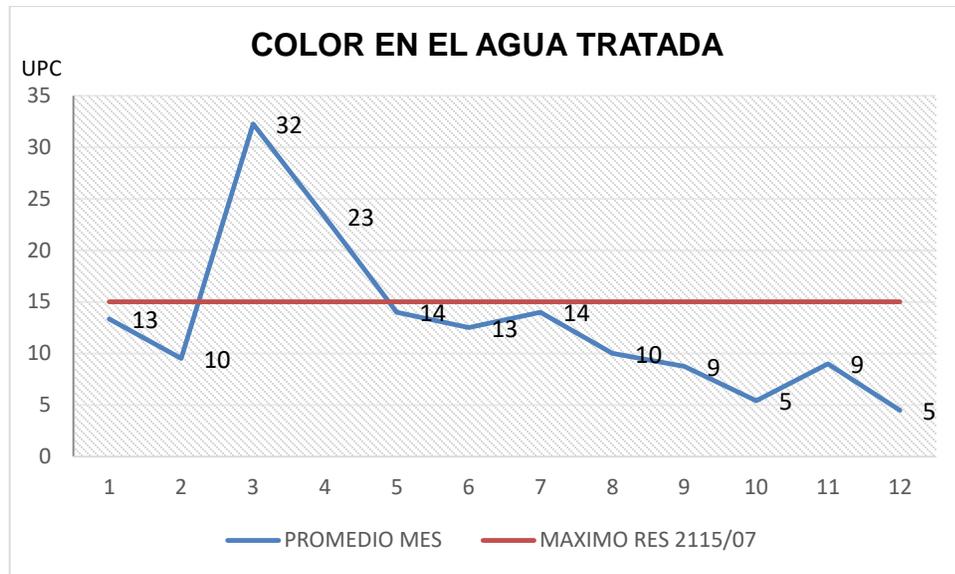
**Gráfica 16. Color en el efluente del sedimentador.**

Comparando los resultados de la Gráfica 16, con los de la Gráfica 17, se puede observar que en la filtración no se realiza una remoción representativa de color, la mayoría de valores se mantienen, excepto los meses de marzo y abril porque las unidades presentes de color en la fuente de abastecimiento son altas.



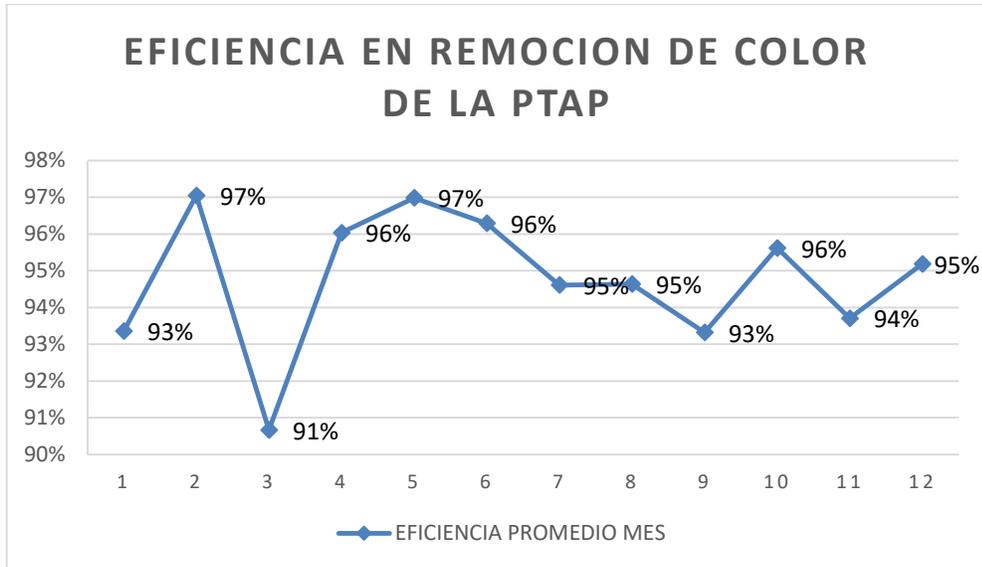
**Gráfica 17. Color en el efluente de los filtros.**

La variación entre los valores del agua filtrada (punto 3 de muestreo) y el agua tratada (punto 4 de muestreo), es apreciable en los meses de marzo y abril (tabla 18) y en menor proporción en julio, agosto, octubre, noviembre y diciembre, debido al efecto probable de la cloración.



**Gráfica 18. Color en el efluente de la planta de tratamiento.**

En la Gráfica 18, se muestran las unidades de color del efluente del sistema de tratamiento, evidenciando que en los meses de marzo y abril no se cumplió con el valor máximo permitido en la resolución 2115 de 2007, para agua potable. La eficiencia del sistema de tratamiento en remoción de color oscila entre 90 y el 96%, como se muestra en la Gráfica 19.



**Gráfica 19. Eficiencia del sistema de tratamiento para remoción de color.**

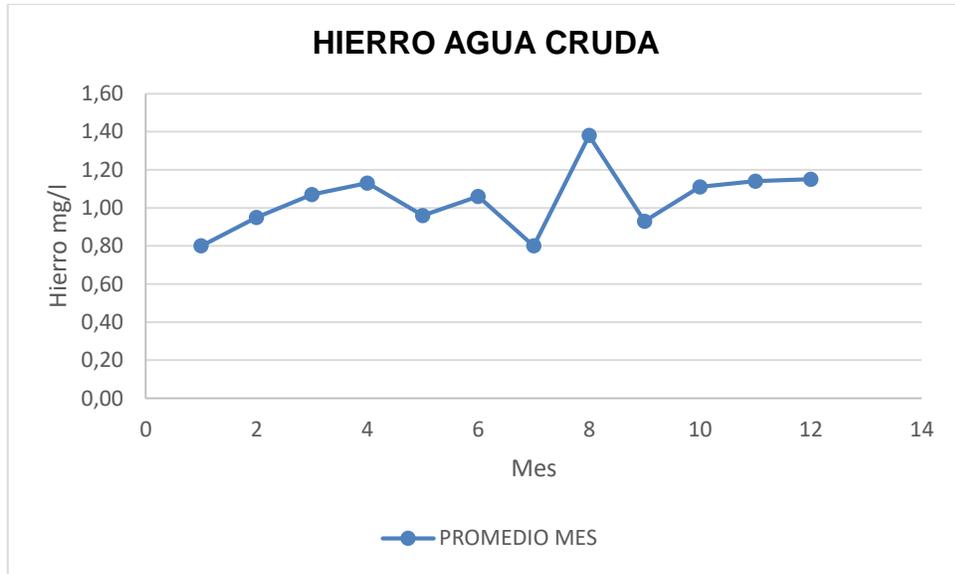
**4.1.5. Hierro.**

El hierro existe en el suelo y minerales, principalmente como oxido férrico insoluble y sulfuro de hierro, en algunas áreas se presenta también como carbonato ferroso y es muy poco soluble (ROMERO ROJAS, 2002), En la tabla 19, se presentan las concentraciones promedio mensuales de hierro (Fe) en el agua cruda y el agua tratada.

**Tabla 19. Concentraciones promedio de Hierro mg/l**

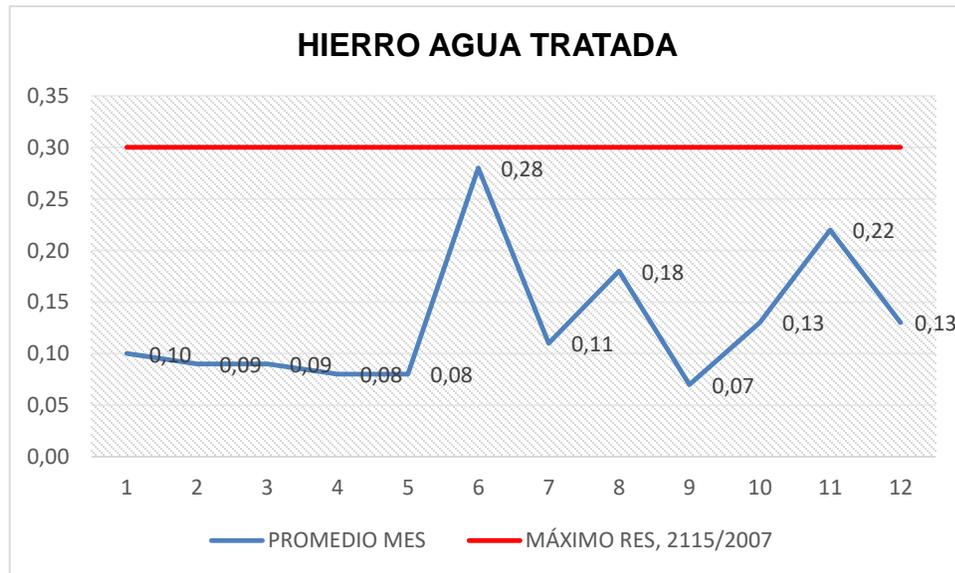
HIERRO (mg/l)		
MES	AGUA CRUDA	AGUA TRATADA
1	0.80	0.10
2	0.95	0.09
3	1.07	0.09
4	1.13	0.08
5	0.96	0.08
6	1.06	0.28
7	0.80	0.11
8	1.38	0.18
9	0.93	0.07
10	1.11	0.13
11	1.14	0.22
12	1.15	0.13

La concentración promedio de hierro en el afluente del sistema de tratamiento varía entre 0,8 y 1,38 mg/l, el valor máximo observado ocurre en el mes de agosto tal y como se evidencia en la Gráfica 20.

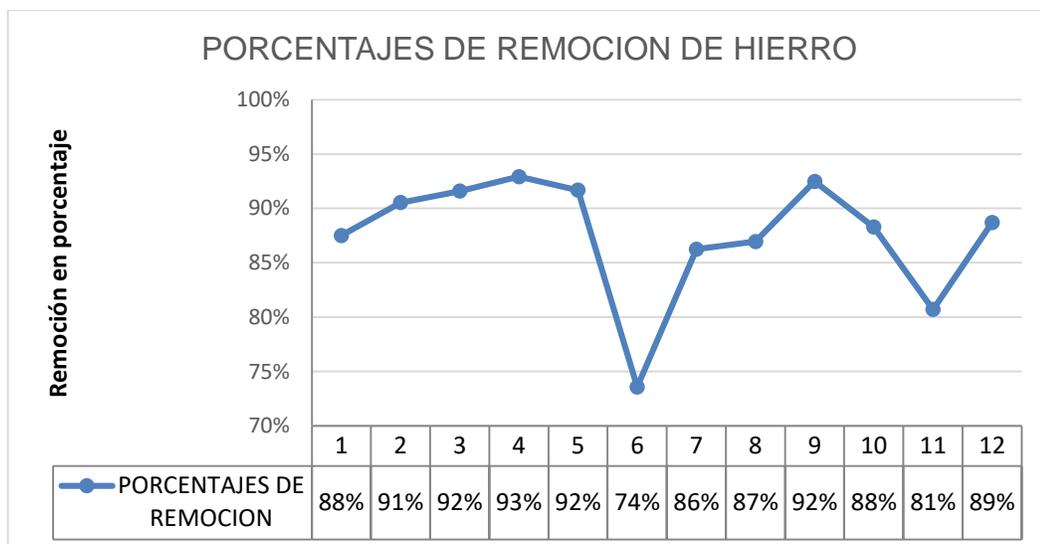


**Gráfica 20. Hierro en el afluente de la planta de tratamiento.**

En la Grafica 21, se observa que en todos los meses del año el agua tratada cumple con la norma para hierro de 0,3 mg/l para agua potable.



**Gráfica 21. Hierro en el efluente de la planta de tratamiento.**



**Gráfica 22. Porcentaje de Remoción de Hierro.**

En la Grafica 22, se puede observar que los porcentajes de remoción de hierro en la planta de tratamiento son altos, sus valores oscilan entre 74 – 93%, lo que indica que el peróxido de hidrógeno oxida eficientemente este elemento cumpliendo en todos los meses con lo establecido en la norma de 0.3 mg Fe/l, para agua potable.

#### **4.1.6. Manganeso.**

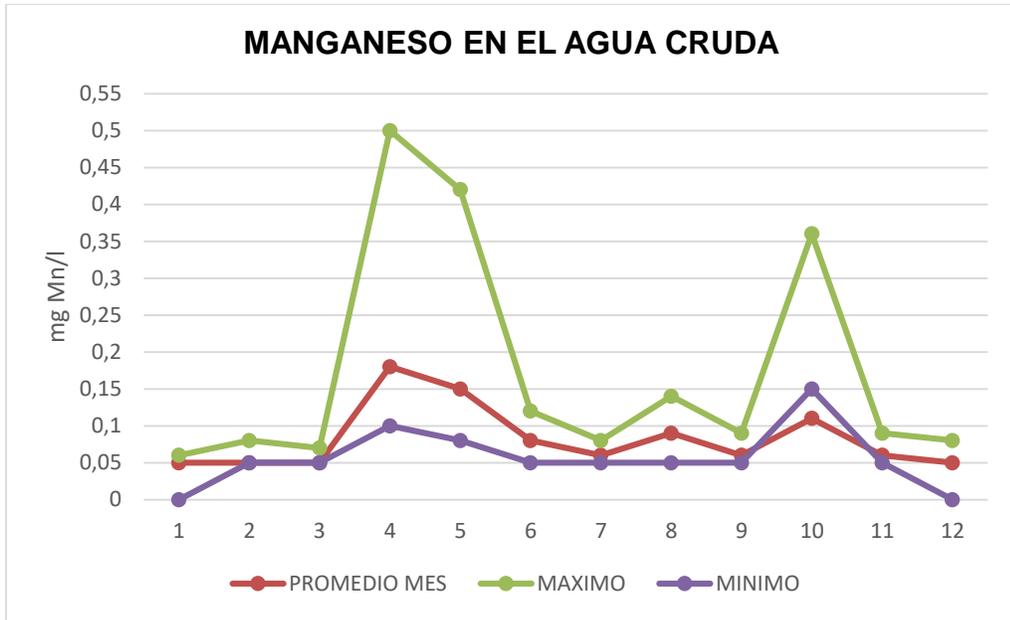
La Tabla 20, presenta las concentraciones de manganeso en los diferentes puntos de muestreo. Como se observa en la Tabla 20 y en la Gráfica 23 las concentraciones de manganeso en el agua cruda oscilan entre 0 y 0,5 mg/l con valores máximos en abril y mayo. El agua tratada cumple la norma de manganeso para agua potable de 0,1 mg/l, con excepción de los meses de abril y mayo.

**Tabla 20. Concentración de manganeso en los cuatro puntos de muestreo.**

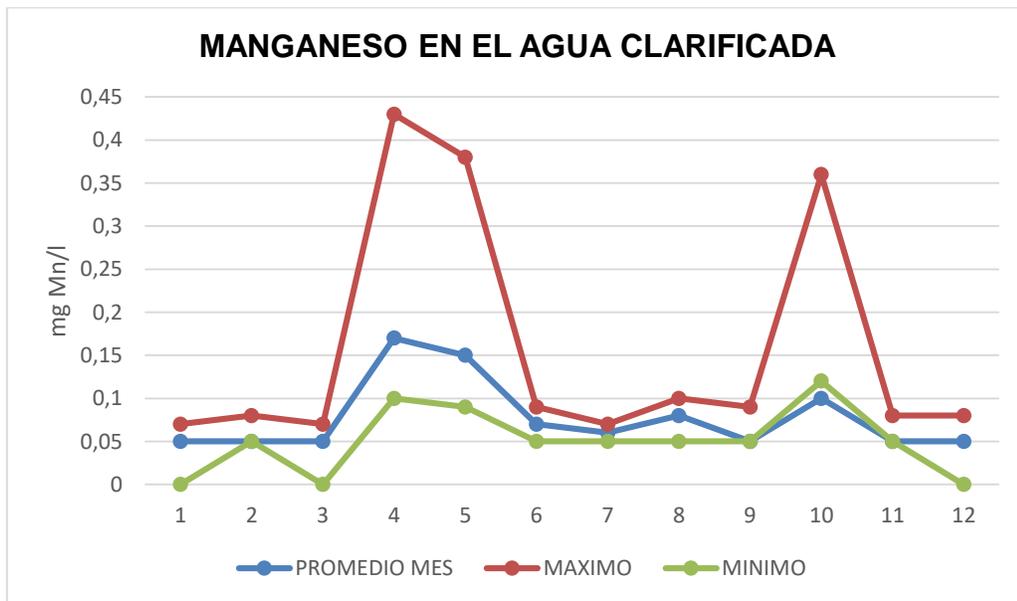
MES	MANGANESO AGUA CRUDA			MANGANESO AGUA CLARIFICADA			MANGANESO AGUA FILTRADA			MANGANESO AGUA TRATADA		
	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO
1	0.05	0.06	0.00	0.05	0.07	0.00	0.05	0.08	0.00	0.05	0.08	0.00
2	0.05	0.08	0.05	0.05	0.08	0.05	0.05	0.07	0.05	0.05	0.05	0.00
3	0.05	0.07	0.05	0.05	0.07	0.00	0.05	0.05	0.00	0.05	0.05	0.00
4	0.18	0.50	0.10	0.17	0.43	0.10	0.16	0.20	0.09	0.15	0.18	0.09
5	0.15	0.42	0.08	0.15	0.38	0.09	0.14	0.23	0.07	0.14	0.19	0.07
6	0.08	0.12	0.05	0.07	0.09	0.05	0.05	0.08	0.05	0.05	0.08	0.05
7	0.06	0.08	0.05	0.06	0.07	0.05	0.06	0.07	0.05	0.06	0.07	0.05
8	0.09	0.14	0.05	0.08	0.10	0.05	0.07	0.10	0.05	0.07	0.12	0.05
9	0.06	0.09	0.05	0.05	0.09	0.05	0.05	0.07	0.05	0.05	0.07	0.00
10	0.11	0.36	0.15	0.1	0.36	0.12	0.08	0.15	0.05	0.08	0.10	0.05
11	0.06	0.09	0.05	0.05	0.08	0.05	0.05	0.07	0.05	0.05	0.07	0.00
12	0.05	0.08	0.00	0.05	0.08	0.00	0.05	0.08	0.00	0.05	0.05	0.00

En la Gráfica 23, se puede observar que las concentraciones máximas de manganeso en la fuente de abastecimiento se dieron en los meses de abril, mayo y octubre, coincidiendo en los meses de abril y mayo con el incremento del color, mostrando que estos parámetros están directamente relacionados, puesto que el incremento del color aparente en el agua es el mayor indicador visual de la posible presencia de manganeso en el agua.

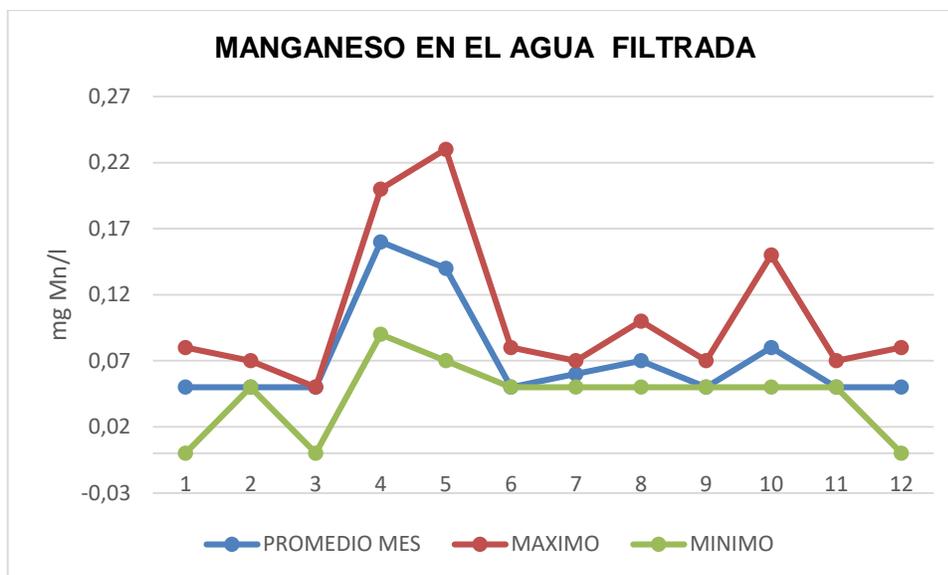
También es pertinente resaltar que el incremento de manganeso en los meses de abril y mayo coincide con los meses de mayores precipitaciones en la cuenca media del Río Bogotá, tal y como se observa en la Gráfica 4. Aparentemente la mayor intensidad de lluvia aporta incremento de manganeso por la escorrentía o por suspensión de lodo sedimentado en el río.



**Gráfica 23. Concentración de manganeso en el agua cruda.**



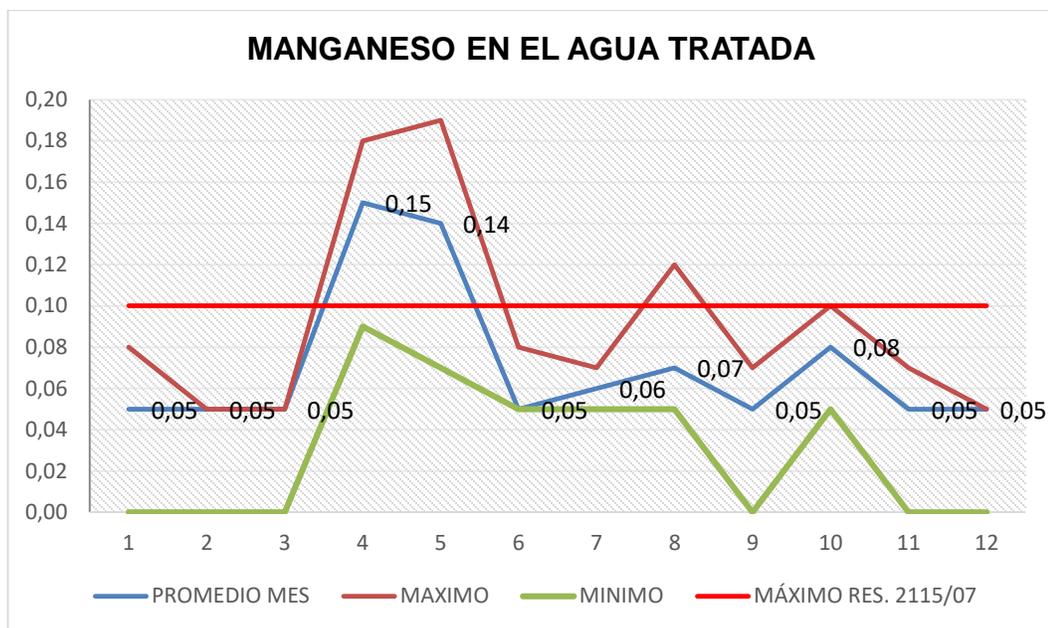
**Gráfica 24. Concentraciones de manganeso en el efluente del sedimentador.**



**Gráfica 25. Concentración de Manganeso en el efluente de filtros.**

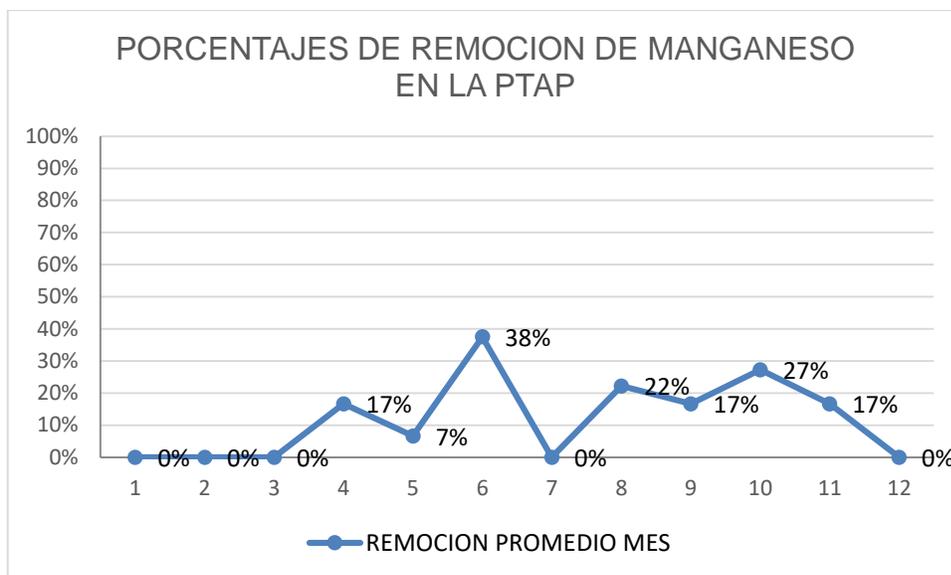
Las concentraciones de manganeso se mantienen iguales en el agua filtrada y en el efluente de la planta, lo que indica que la desinfección no tiene efecto en la remoción de manganeso.

En la Gráfica 26, se observan las concentraciones de manganeso en el agua tratada, evidenciando que las concentraciones promedio cumplen con el valor máximo permisible para agua potable de 0.1 mg Mn/l, excepto los meses de abril y mayo.



**Gráfica 26. Datos de Manganeso en el efluente de la planta de tratamiento.**

Tal como se observa en la Gráfica 27, los porcentajes de remoción de manganeso varían entre 0 y 37%, lo que indica que el  $H_2O_2$  no logra altas remociones de manganeso, en este caso, para agua de baja concentración.



**Gráfica 27. Porcentajes de Remoción de Manganeso de la PTAP.**

#### **4.2. ANALISIS DEL PROCESO DE OXIDACIÓN**

En la Tabla 21, se presenta el consolidado de las dosis promedio de peróxido de hidrogeno ( $H_2O_2$ ) aplicadas y su efecto en la remoción de manganeso.

**Tabla 21. Resumen de Condiciones y resultados de la oxidación con peróxido de hidrógeno – 2015.**

Mes	AGUA CRUDA			AGENTE OXIDANTE	AGUA TRATADA				
	pH	Mn Promedio (mg/l)	Fe promedio (mg/l)	Dosis promedio (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	pH	Mn promedio (mg/l)	Fe promedio (mg/l)	Remoción Promedio Mes Mn	Remoción Promedio Mes Fe
<b>Enero</b>	7,3	0,05	0,8	1,5	6,9	0,05	0,10	0%	88%
<b>Febrero</b>	6,8	0,05	1,0	3	6,8	0,05	0,09	0%	91%
<b>Marzo</b>	7,0	0,05	1,1	4	6,8	0,05	0,09	0%	92%
<b>Abril</b>	7,0	0,18	1,1	5	6,8	0,16	0,08	17%	93%
<b>Mayo</b>	7,4	0,15	1,0	3	6,9	0,14	0,08	7%	92%
<b>Junio</b>	7,1	0,08	1,1	2,5	6,7	0,05	0,28	38%	74%
<b>Julio</b>	7,3	0,06	0,8	4,5	6,7	0,06	0,11	0%	86%
<b>Agosto</b>	7,1	0,09	1,4	2	6,8	0,07	0,18	22%	87%
<b>Septiembre</b>	7,5	0,06	0,9	3	7,2	0,05	0,07	17%	92%
<b>Octubre</b>	7,3	0,11	1,1	4	7,1	0,08	0,13	27%	88%
<b>Noviembre</b>	7,3	0,06	1,1	1,5	7,1	0,05	0,22	17%	81%
<b>Diciembre</b>	7,2	0,05	1,2	2	7,0	0,05	0,13	0%	89%

En la Tabla 21, se puede observar que las concentraciones de hierro y manganeso en el agua cruda son bajas, para el hierro oscilan entre 0,8 y 1,4 mg/l y para el manganeso fluctúan entre 0,05 - 0,18 mg/l.

Las dosis de peróxido de hidrogeno varían entre 1,5 y 5 mg/l. La oxidación de hierro (Fe) permite en todos los meses satisfacer el valor máximo establecido por la norma de 0,3 mg/l en agua potable y se obtienen eficiencias de remoción altas, del orden de 88 a 93%

La oxidación con peróxido de hidrógeno no permitió de forma permanente la obtención de un residual menor de 0,1 mg/l – Mn, como lo exige la norma para agua potable. Dado que el pH del agua oxidada es inferior a 7,2 en todos los casos; se puede afirmar que para mejorar la eficiencia en remoción de manganeso es necesario contar con rangos óptimos de pH, probablemente mayores de 10, como lo indica la literatura consultada.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El sistema de tratamiento convencional del Municipio de Tocancipá – Cundinamarca, no logra remoción de manganeso, con peróxido de hidrógeno, para dar cumplimiento permanente a la resolución 2115 de 2007.
- La fuente de abastecimiento, Río Bogotá a la altura de la bocatoma del sistema de purificación, presenta valores de pH entre 6,8 y 7,5 unidades y alcalinidad entre 12,5 y 20 mg/l, los cuales son bajos y no son favorables para la remoción de manganeso.
- El manganeso es un elemento que requiere de pH alto para su precipitación y remoción como lo indica la experiencia analizada y la bibliografía revisada y referenciada en este estudio. Para lograr una oxidación adecuada se recomiendan valores superiores a 10 unidades de pH.
- Desde el punto de vista hidráulico la planta opera adecuadamente cumpliendo con los parámetros establecidos en las normas técnicas para diseño de PTAP.

- Se observa un incremento en el valor promedio de la turbiedad, el color y el manganeso en los meses de marzo y abril, lo cual coincide con el incremento histórico de las precipitaciones en el municipio y en la cuenca alta del río Bogotá, que se da en estos meses.
  
- Se recomienda realizar ensayos de jarras permanentes para optimizar el proceso de tratamiento para cumplir con las remociones adecuadas y dar cumplimiento permanente a los valores establecidos en la resolución 2115 de 2007, minimizar los costos de tratamiento y determinar:
  - ✓ pH óptimo de coagulación.
  - ✓ Dosis óptima y tipo de Oxidante.
  - ✓ Gradiente de Mezcla.
  - ✓ Tiempo de contacto óptimo para la reacción de oxidación.

## BIBLIOGRAFIA

- American Water Works Association. Treatment technologies for groundwater.
- American Water Works Association, (2012) Water Treatment Plant Design - fifth Edition. McGraw Hill,
- APHA, AWWA, WEF (2004). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th Edition. Washington.
- ARBOLEDA, J. (2000). Teoría y Práctica de la purificación del agua. Tercera edición. McGraw Hill, México.
- Best Practice Guide on Metals Removal from Drinking Water.
- CAR Cundinamarca. (2006). Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Bogotá. Bogotá.
- CLEASBY, J.L (1975). "Iron And Manganese Removal- A Case Study". Journal AWWA, 67:3:147
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR. Adecuación Hidráulica y Recuperación Ambiental Río Bogotá,

- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2006). Acuerdo número 43 del 17 de Octubre de 2006. Bogotá.
- DAVISON, W. (1993). Iron and manganese in lakes. *Earth-Science Reviewa*, 34, 119-163.
- DITORO, D. (2001). *Sediment Flux Modeling*. New York: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- EDZWALD JAMES K. *water quality and treatment*. Published by AWWA and MacGraw – Hill.
- E.P.A. (2004). *Drinking Water Health Advisory for Manganese*. Health and Ecological Criteria Division.
- E.P.A. (2006). *Occurrence of Manganese in Drinking Water and Manganese Control*.
- HANSON, Adrian; BATES, Jared., BRISTOL Dean., HEIL Andrew (1999). *Arsenic Removal From Water Using Manganese Greensand: Laboratory Scale Batch And Column Studies*. Water Treatment Technology Program Report No. 41. New Mexico State University.

- <https://www.cleanwaterstore.com/blog/can-hydrogen-peroxide-be-used-to-remove-manganese-and-iron-from-well-water/>. (Mayo 3 de 2015) The study found that "hydrogen peroxide at these (varying) pH levels did not prove to be an adequate oxidizing agent for manganese.
- HUERTA DÍAZ, M. A. (2004). Geoquímica de sedimentos. Capítulo 4: Oxihidroxidos de hierro y manganeso. Instituto de Investigaciones Oceanológicas. Universidad Autónoma de Baja California. División de Geoquímica Ambiental
- KNOCKE, W.R.; OCCIANO, S.; HUNGATE, R. (1990). Removal Of Soluble Manganese From Water By Oxide-Coated Filter Media. Awwa Research Foundation and American Water Works Association. Denver, Colorado.
- MACKENZIE, R.M. (1980). The adsorption of lead and other heavy metals on oxides of manganese and iron. Aust. J. Soil Res. 18, 61-73.
- Ministerio del Desarrollo Económico (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. Bogotá, Colombia
- MORGAN, J. J., (1967). Chemical equilibria and kinetic properties of manganese in natural waters. En S.D. Faust & J. V: Hunter, *Principles*

*and Applications of Water Chemistry*, p.p. 561-623. John Wiley and Sons, Inc.

- Problemas del agua potable: El hierro y el manganeso, Universitario de Texas A&M.
  
- Postawa Adam and Hayes Colin. Best Practice Guide on the Control of Iron and Manganese. The International Water Association.
  
- Posselt, Anderson, y Weber (1968), Ocurrencia de manganeso en el agua potable y el control de manganeso.
  
- RAMSTEDT, Madeleine. (2004). Chemical Processes at the Water-Manganite (g- MnOOH) Interface. Tesis de grado. Department of Chemistry, Inorganic Chemistry. Umeå University SWEDEN.
  
- Removal of manganese from water supplies intended for human consumption: a case study, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Catania, Italy.
  
- ROMERO R, Jairo, (2006). Purificación del Agua. Escuela Colombiana de Ingeniería.

- ROMERO R, Jairo, (2009). Calidad del Agua. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Ministerio de la Protección Social - Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución No. 2115 de 2007, “Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.”
- SOMMERFELD, Elmer O. (2000). Iron and Manganese Removal Handbook. American water Works association.
- SPELLMAN FRANK R. The Science of water concepts and applications. Lancaster Basel.
- Standart Methods.
- STEVENSON DAVID G. Water Treatment Unit Processes. Imperial College Press.
- U. S. Environmental Protection Agency, Health effects for manganese.

- U.S. Department of Health and Human Services. (2012). Toxicological profile for manganese. Atlanta.
  
- U. S. Environmental Protection Agency, Drinking Water Criteria for Manganese, Bibliogov.
  
- U. S. Environmental Protection Agency, Iron and manganese removal.