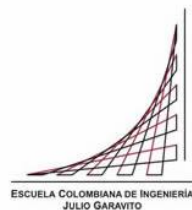


# **Maestría en Ingeniería Civil**

**Tratamiento de agua rica en hierro con almidón de maíz y alumbre**

**Amparo Carolina Castañeda Jiménez**

**Bogotá, D.C., 05 de noviembre de 2015**



# **Tratamiento de agua rica en hierro con almidón de maíz y alumbre**

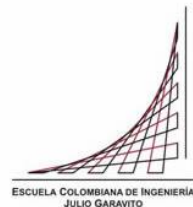
**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con  
énfasis en recurso hidráulicos y medio ambiente**

**Jairo A. Romero Rojas**

**Ingeniero Civil, MEEE**

**Director**

**Bogotá, D.C., 05 de noviembre de 2015**



## **NOTA DE ACEPTACION**

La tesis titulada: **TRATAMIENTO DE AGUA RICA EN HIERRO CON ALMIDÓN DE MAÍZ Y ALUMBRE**, realizada por la estudiante **AMPARO CAROLINA CASTAÑEDA JIMENEZ**, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de Magister en Ingeniería Civil con énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente, fue evaluada como APROBADA por el jurado evaluador el día \_\_\_\_\_.

---

**Bióloga, ESP. ROCÍO GONZÁLEZ**

Jurado evaluador

---

**Ingeniera Civil, MG. CAROLINA ROMERO**

Jurado evaluador

---

**Ingeniero Civil, MEEE. JAIRO A. ROMERO ROJAS**

Director de Proyecto

## **RESUMEN**

En presente documento revisar y analizar las aptitudes del almidón de maíz y alumbre como coagulante y la aplicación de estos a un agua de manantial con una alta concentración de hierro total.

En el capítulo 1 se realiza la introducción de del tema en estudio; en el capítulo 2 se describen los objetivos del estudio; en el capítulo 3 se incluyen algunos antecedentes; en el capítulo 4 se exponen los conceptos básico requeridos para el estudio; en el capítulo 5 se presenta la metodólogo utilizada en los análisis; en el capítulo 6 se muestran los resultados de cada uno de los ensayos físico químicos y de tratabilidad realizados; en el capítulo 7 se hace el análisis de los resultados de remoción de hierro obtenido por cada uno de los métodos utilizados. Finalmente en el capítulo 8 se exponen las conclusiones deducidas del estudio realizado.

## CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	9
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS.....	10
CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES.....	11
CAPÍTULO 4. REVISIÓN LITERARIA.....	14
4.1. Calidad de agua subterránea.....	14
4.1.1. Hierro .....	14
4.2. Métodos de remoción de hierro .....	15
4.2.1. Precipitación química.....	16
4.2.1.1. Precipitación con Cal.....	16
4.2.1.2. Coagulación .....	16
4.2.1.2.1. Alumbre (Sulfato de aluminio):.....	17
4.2.1.2.2. Cloruro férrico:.....	17
4.2.2. Oxidación Química .....	17
4.2.2.1. Cloro.....	17
4.2.2.1.1. Oxidación química mediante cloro.....	18
4.2.2.2. Permanganato de Potasio .....	19
4.2.2.2.1. Oxidación química mediante permanganato de potasio.....	19
4.2.2.3. Ozono.....	20
4.2.3. Sistemas de Aireación .....	20
4.2.3.1. Columna de percolación: .....	21
4.2.3.2. Bandejas de aireación: .....	22
4.2.3.3. Aireación Difusa o de burbuja:.....	22
4.2.3.4. Aireación de superficie: .....	22
4.2.3.5. Aireadores por Rociado: .....	22

4.2.4.	Oxidación Biológica .....	23
4.3.	Almidón de maíz.....	23
4.3.1.	Componentes del almidón .....	24
4.4.	Ensayo de tratabilidad .....	25
CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA .....		27
5.1.	Muestras.....	27
5.2.	Método de análisis.....	28
5.3.	Ensayos de jarras.....	29
CAPÍTULO 6. RESULTADOS.....		31
6.1.	Agua Cruda .....	31
6.2.	Ensayos de jarras.....	32
6.3.	Físico químico del agua tratada.....	39
6.4.	volumen de sedimentos.....	40
CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		41
7.1.	Agua cruda .....	41
7.2.	Agua tratada.....	41
7.2.1.	Color.....	41
7.2.2.	Turbiedad .....	42
7.2.3.	Conductividad.....	43
7.2.4.	pH.....	45
7.2.5.	Hierro .....	46
7.3.	Comparación análisis fisicoquímico .....	47
7.4.	Análisis económico .....	48
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES .....		49
CAPÍTULO 9. REFERENCIAS .....		50

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1	Dosis químicas utilizadas en la plata de tratamiento de wilkinsburg ...	12
Tabla 4-1	Composición del almidón de maíz .....	24
Tabla 5-1	Parámetros fisicoquímicos medidos en el laboratorio .....	29
Tabla 6-1	Caracterización del agua cruda .....	31
Tabla 6-2	Ensayo de jarras con alumbre .....	32
Tabla 6-3	Ensayo de jarras con alumbre .....	32
Tabla 6-4	Ensayo de jarras con alumbre y cal.....	33
Tabla 6-5	Ensayo de jarras con alumbre y cal.....	33
Tabla 6-6	Ensayo de jarras con alumbre y cal.....	33
Tabla 6-7	Ensayo de jarras con almidón .....	34
Tabla 6-8	Ensayo de jarras con almidón .....	34
Tabla 6-9	Ensayo de jarras con almidón .....	34
Tabla 6-10	Ensayo de jarras con almidón .....	35
Tabla 6-11	Ensayo de jarras con almidón y cal .....	35
Tabla 6-12	Ensayo de jarras con almidón, cal y alumbre .....	36
Tabla 6-13	Ensayo de jarras con almidón y cloruro férrico .....	36
Tabla 6-14	Ensayo de jarras con cloruro férrico .....	37
Tabla 6-15	Ensayo de jarras con cloruro férrico y cal.....	37
Tabla 6-16	Ensayo de jarras con cal .....	37
Tabla 6-17	Ensayo de jarras con cal .....	38
Tabla 6-18	Ensayo de jarras con cloruro férrico y cal.....	38
Tabla 6-19	Caracterización del agua tratada.....	39
Tabla 6-20	Sólidos sedimentables.....	40

Tabla 7-1	Color agua tratada.....	41
Tabla 7-2	Turbiedad final según el tipo de tratamiento .....	42
Tabla 7-3	Conductividad final según el tipo de tratamiento .....	44
Tabla 7-4	pH final según el método de tratamiento .....	45
Tabla 7-5	Hierro final según el tipo de tratamiento .....	46
Tabla 7-6	Resultados análisis fisicoquímicos agua tratada.....	47
Tabla 7-7	Costo de cada tratamiento .....	48

### **LISTA DE FIGURAS**

Figura 4-1	Oxidación química mediante cloro.....	18
Figura 4-2	Oxidación química mediante permanganato.....	19
Figura 4-3	Amilosa .....	24
Figura 4-4	Amilopectina.....	25
Figura 5-1	Localización del manantial .....	27
Figura 6-1	Sólidos sedimentables.....	40
Figura 7-1	Color según método de tratamiento.....	42
Figura 7-2	Turbiedad según método de tratamiento .....	43
Figura 7-3	Conductividad según método de tratamiento.....	44
Figura 7-4	pH según método de tratamiento .....	45
Figura 7-5	Hierro según método de tratamiento .....	46

### **LISTA DE FOTOGRAFIAS**

Fotografía 5-1	Muestra manantial la vega .....	28
Fotografía 5-2	Ensayo de jarras .....	30



## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCION**

El hierro y el manganeso disueltos se encuentran principalmente en aguas subterráneas, las cuales constituyen alrededor del 97% del agua dulce disponible del planeta. El contacto prolongado del agua subterránea con los minerales de la corteza terrestre introduce elementos en solución que, como el hierro, hacen necesario su tratamiento.

El hierro ferroso del agua subterránea, cuando se pone en contacto con el oxígeno del aire, es oxidado en hierro férrico, formando hierro coloidal y produciendo color y turbiedad. El hierro, además favorece el crecimiento de bacterias de hierro que producen depósitos y problemas de aguas rojas en el abastecimiento. El límite para el hierro en el agua potable es de 0.3 mg/L para prevenir problemas de tinciones en los accesorios de plomería, coloración de la ropa y sabores indeseables.

Existen diferentes métodos para la remoción del hierro, como lo son oxidación química y biológica, aireación y, entre los más utilizados en las plantas de tratamiento de agua potable coagulación, floculación, sedimentación y filtración.

Los coagulantes más usados para la clarificación del agua son de tipo inorgánico, los cuales acarrearán desventajas económicas, pues en su proceso de fabricación se consume energía y materia, lo que se traduce en costos procesos de producción.

Los coagulantes naturales, como el almidón de maíz, constituyen una alternativa atractiva de tratamiento por su bajo costo y porque no tienen ninguna repercusión en la salud humana.

Durante el desarrollo de ese trabajo se analizaron la efectividad de diferentes coagulantes para la remoción del hierro, incluyendo el almidón de maíz, estableciendo diferentes dosis óptimas que garanticen la remoción de hierro en más de un 90% en el agua en estudio.

## **CAPÍTULO 2. OBJETIVOS**

- Revisar y analizar críticamente las aptitudes del almidón de maíz como coagulante.
- Determinar la eficiencia del tratamiento con almidón de maíz y alumbre.
- Ilustrar los procesos existentes de tratamiento con almidón de maíz y alumbre.
- Evaluar costos del tratamiento con almidón de maíz y alumbre.

### CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES

En los últimos años el agua subterránea se ha vuelto una de las principales fuentes de agua potable. El fácil acceso a dicho recurso ha facilitado la disponibilidad de agua potable a amplios sectores de la población mundial y ha sido particularmente importante en países en vías de desarrollo. En algunas zonas, la dependencia de las aguas subterráneas como fuente de agua potable es mucho mayor, particularmente en áreas rurales y de población dispersa sin acceso a redes de distribución. En Estados Unidos más del 80% de la población se abastece de pozos. (Burbano, 2011).

El agua subterránea es de mejor calidad en términos de turbiedad que las fuentes superficiales, sin embargo pueden contener hierro y manganeso, en forma soluble o insoluble generando problemas de olor, color y sabor. (Di & Sabogal Paz, 2008).

La presencia de hierro y manganeso hoy en día es uno de los principales problemas en el tratamiento de aguas, por tal razón se han venido adelantando diferentes investigaciones sobre tecnologías referentes a la remoción de dichos elementos.

Entre las tecnologías conocidas se tienen: sistemas biológicos que combinan la aireación y filtración por goteo o micro-filtración, filtros con membranas de celulosa o “greensand”, lechos filtrantes que requieren del uso de sustancias químicas como el ácido nítrico para su mantenimiento, oxidación con permanganato de potasio. (Burbano, 2011).

Reginald B. Adas, en 1948, realizó estudios sobre la remoción de manganeso por medio de oxidación con permanganato de potasio en la planta de tratamiento de Wilkinsburg. El principal afluente de dicha planta constaba de una mezcla de agua de río Allegheny y agua subterránea. Para este estudio se seleccionaron diferentes coagulantes antes del tratamiento con permanganato, sus respectivas dosificaciones se muestran en la **Tabla 3-1**. (Adams, 1960).

**TABLA 3-1 DOSIS QUÍMICAS UTILIZADAS EN LA PLATA DE TRATAMIENTO DE WILKINSBURG**

<b>Químicos</b>	<b>Cantidad usada (mg /l)</b>
Cloro	2,276
Cal	22,283
Permanganato de potasio.	1,198
Alumbre	30,790
Ayudantes de coagulación	2,995

Los estudios realizados demuestran que el alumbre tuvo un buen funcionamiento. (Adams, 1960).

Generalmente las plantas de tratamiento de agua potable utilizan como coagulantes sales de aluminio o de hierro para desestabilizar partículas coloidales. Desde los años 70 en adelante se propuso la utilización de coagulantes naturales, con el propósito de reducir el consumo de reactivos químicos; sin embargo, el desarrollo de estos coagulantes no tuvo un auge significativo debido a la comercialización y utilización de polímeros sintéticos en procesos convencionales de tratamiento como coagulantes primarios o ayudantes de floculación, los cuales pueden ser contaminados durante su proceso de fabricación con monómeros u otras sustancias tóxicas, entre las cuales se encuentra la acrilamida y de ahí pueden reaccionar con las demás sustancias químicas añadidas al agua durante su tratamiento, como es el caso del ozono y del cloro, generando sustancias peligrosas para la salud, pudiendo no ser removidas en el tratamiento convencional antes de llegar al usuario y/o consumidor. (Perez Carrion, 1992).

Por otra parte, los polímeros orgánicos o de origen natural presentan por lo general una mínima o nula toxicidad, dado que en muchos casos se utilizan como comestibles o con el propósito de tratamiento de aguas para consumo. De acuerdo con lo anterior, las alternativas de tratamiento de aguas basadas en la utilización de coagulantes naturales en los procesos de clarificación, se hace más que necesaria, imprescindible teniendo en cuenta las condiciones económicas actuales de muchos países. (Rodriguez, Lugo, & Malaver, 2011).

Estudios han logrado comprobar que las mezclas de sulfato de aluminio con almidón de yuca tienen un potencial de coagulación-floculación y podrían ayudar al tratamiento de las aguas superficiales. El empleo de almidón como agente coadyuvante en la remoción de color, mezclado con sulfato de aluminio (agente coagulante), permitiría reducir el costo económico, el impacto ambiental y los efectos a la salud pública. ( (Solís Silvan, Laines Canepa, & Hernández Barajas, 2012).

También se realizó un estudio de floculación y coagulación con almidón de plátano en el cual durante las pruebas de jarras y los datos de turbiedad indicaron que el almidón utilizado es efectivo como ayudante de floculación, cuando se usa sulfato de aluminio líquido. De este modo se corrobora que el almidón de plátano es prometedor para substituir el uso de polielectrolitos comerciales y reducir así los costos de los tratamientos por coagulación/floculación. (Trujillo, y otros, 2014).

## **CAPÍTULO 4. REVISIÓN LITERARIA**

### **4.1. CALIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA**

El agua subterránea es mundialmente importante para el consumo humano, y los cambios en su calidad pueden tener serias consecuencias. También es importante para el sustento de hábitats y para el mantenimiento de la calidad del flujo base que alimenta los ríos. La composición química del agua subterránea es una medida de su conveniencia como fuente de abastecimiento para consumo humano y animal, para irrigación, para la industria y otros propósitos.

También influye en la salud y el funcionamiento de ecosistemas, por lo que es importante para detectar variaciones y dar las alertas tempranas de cambios en su calidad, tanto en sistemas naturales como en los resultantes de contaminación. (Reino Moyón, 2013).

La calidad del agua subterránea como fuente de abasto se compara favorablemente, con las aguas superficiales, debido al menor número de procesos necesarios para su potabilización. El agua subterránea se ve influenciada por la geología del suelo, el clima, las actividades humanas, el hierro, manganeso, fosfatos, sabor, olor, alcalinidad, pesticidas, gas carbónico, otros. El hierro y el manganeso son una de las mayores causas de problemas en los sistemas de suministro de agua para consumo humano de fuentes subterráneas. Los tratamientos aplicados para remover hierro y manganeso son variados y dependen del estado en que se encuentre el mineral (Loaiza Duque, 2009).

#### **4.1.1. Hierro**

El hierro es el cuarto elemento más abundante en la tierra y es un constituyente normal del organismo humano (forma parte de la hemoglobina) y diariamente los humanos necesitamos entre 10 y 50 mg/día.

Por lo general, sus sales no son tóxicas en las cantidades comúnmente encontradas en las aguas naturales. La presencia de hierro puede afectar el sabor del agua, producir manchas indelebles sobre los artefactos sanitarios y la ropa blanca. También puede formar depósitos

en las redes de distribución y causar obstrucciones, así como alteraciones en la turbiedad y el color del agua. (Burbano, 2011).

La remoción de Hierro (Fe) y Manganeseo (Mn) dependen del estado en que se encuentre el mineral y de la calidad del agua presente. En aguas subterráneas en ausencia de oxígeno, las formas de hierro (hierro ferroso, Fe (II)) y manganeseo Mn(II), pueden aparecer en forma reducida (estado de oxidación +2) como iones metálicos libres  $Fe^{2+}$  y  $Mn^{2+}$ , o en forma compleja con material orgánico natural como es el caso de aguas superficiales, los cuales pueden ser afectados por la tensión iónica a la concentración de las especies disueltas, como ligantes que pueden formar compuestos de coordinación o complejos con el metal (AWWA, 2002).

La forma del hierro en el agua depende, ante todo, del pH y del potencial de oxidación reducción. El hierro puede pasar de una forma disuelta (por ejemplo,  $Fe^{2+}$  o  $FeOH^+$ ) a una forma precipitada ( $FeCO_3$ ,  $Fe(OH)_2$  o  $Fe(OH)_3$ ), al aumentarse el potencial (oxidación), el pH, o ambos. (AWWA, 2002).

El hierro al oxidarse, ya sea al momento de la cloración o con el oxígeno del aire, se precipita generando un color rojo-oscuro que provoca el rechazo de los consumidores, manchan la ropa, obstruyen tuberías, accesorios y bombas, reducen la capacidad hidráulica de las redes, generando altos costos en la operación y mantenimiento de sistema de abasto por reposición y reparación de las mismas. Las concentraciones elevadas de hierro y manganeseo pueden acelerar el crecimiento biológico en los sistemas de distribución y contribuir a los problemas de sabor y olor en el agua, así mismo aumentan la demanda de cloro u otros oxidantes aplicados en la desinfección, igualmente los bajos niveles de oxígeno contribuyen con problemas de olor y sabor en el agua (Loaiza Duque, 2009).

## **4.2. MÉTODOS DE REMOCIÓN DE HIERRO**

Existen diferentes tecnologías de tratamiento para la remoción de hierro como precipitación química, oxidación química (cloro, Ozono, permanganato de potasio), oxidación biológica, sistemas de aireación, intercambio iónico, adsorción en medios acondicionados y procesos secuestrantes.

### **4.2.1. Precipitación química**

La remoción de hierro y manganeso del agua por precipitación química depende principalmente del estado disuelto en que se encuentra los compuestos formados en el agua. Los procesos más utilizados en la precipitación química son la coagulación y la aplicación de cal. (Loaiza Duque, 2009).

#### **4.2.1.1. Precipitación con Cal**

La cal es utilizada básicamente para el proceso de ablandamiento del agua y es efectiva para remover  $Fe^{++}$  y  $Mn^{++}$  especialmente si el pH es mayor de 9,8 y existe alcalinidad suficiente (20 mg/l).

El ablandamiento con cal es el utilizado habitualmente, debido a que las aguas destinadas al consumo humano suelen contener un nivel de bicarbonatos suficiente.

La reacción de la cal con la dureza es muy lenta en ausencia de gérmenes de cristalización. Por el contrario, en contacto con una masa suficiente de cristales de carbonato cálcico ya formados, la reacción transcurre en varios minutos. Como la precipitación se efectúa sobre los cristales, éstos tienden a aumentar su volumen, con lo que aumenta la velocidad de sedimentación. Esto ocurre si la superficie de los cristales de  $CO_3Ca$  se encuentra suficientemente limpia. Por ello, la presencia de sustancias orgánicas coloidales puede impedir la cristalización, siendo una de las razones por las que se realiza simultáneamente una coagulación-floculación. (Espigares García & Pérez López).

#### **4.2.1.2. Coagulación**

La coagulación es un proceso que tiene por objeto desestabilizar material coloidal y agrupar partículas dispersas en el agua en otras más voluminosas y pesadas que puedan ser separadas por filtración y sedimentación. En este caso la coagulación permite formar hidróxidos de hierro o aluminio de baja solubilidad y lograr su precipitación.

A pH alto de hidróxido metálico se precipita mejor; sin embargo el pH no puede ser demasiado alto porque el hidróxido metálico podría redisolverse.



#### 4.2.1.2.1. Alumbre (Sulfato de aluminio):

Es un coagulante común para el tratamiento de aguas, su fórmula química es  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O$ . Al utilizarlo se disminuye el pH, porque reaccionan con la alcalinidad para formar los precipitados metálicos si la alcalinidad no es suficiente se debe se adicionar cal para garantizar el pH óptimo de coagulación.

El pH óptimo para coagulación con alumbre debe determinarse experimentalmente, generalmente de 5,5 a 8. (Cardenas & Castañeda, 2011).

#### 4.2.1.2.2. Cloruro férrico:

El cloruro férrico,  $FeCl_3$ , es un excelente coagulante, porque el hidróxido férrico es más insoluble que el de aluminio y precipita en un rango de pH más amplio.

Se ha visto que la dosis de cloruro férrico es más baja que la de alumbre para obtener los mismos resultados. Además es un efectivo coagulante que actúa en amplios rangos de pH y temperatura. (Cardenas & Castañeda, 2011).

### 4.2.2. Oxidación Química

Los procesos de oxidación química son variados y su naturaleza de reacción depende de las sustancias oxidantes empleadas. La oxidación química se divide en sustancias oxidantes como el cloro, ozono, permanganato de potasio. (Loaiza Duque, 2009)

Al utilizar sustancias químicas como oxidantes del hierro, es importante garantizar un tiempo de contacto entre 5 y 30 minutos que permita una eficiente y completa reacción química. A continuación se presentan los oxidantes químicos más comunes usados en el tratamiento de aguas:

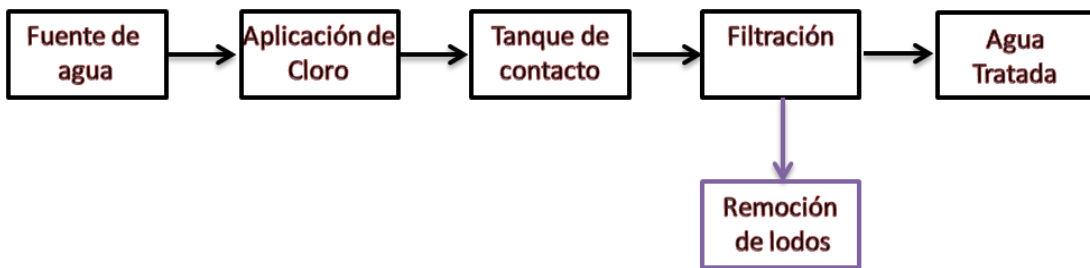
#### 4.2.2.1. Cloro

El comportamiento del cloro es distinto según se utilice como oxidante o como desinfectante. La eficacia del cloro como bactericida aumenta al disminuir el pH, mientras que su eficiencia como oxidante para substancias tales como  $Fe^{+2}$ ,  $Mn^{+2}$ ,  $CN^-$ ,  $SH_2$ ,  $NO_2^-$  aumenta generalmente al aumentar el pH (Weber, 1979).

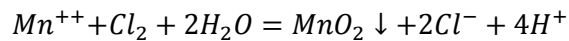
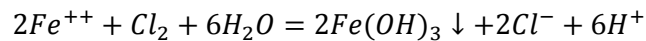
#### 4.2.2.1.1. Oxidación química mediante cloro

Es un proceso de oxidación-filtración que consiste en un sistema de dosificación de cloro seguido por sedimentación y filtración para garantizar la remoción del precipitado de hierro y manganeso, como se muestra en la **Figura 4-1**. (HDR Engineering, 2001).

**FIGURA 4-1 OXIDACIÓN QUÍMICA MEDIANTE CLORO**



La remoción de hierro y manganeso se puede representar químicamente con las siguientes ecuaciones (Romero Rojas, 2009).



De estas ecuaciones se obtiene:

$$1 \frac{mg}{L} - Cl_2 \text{ oxida } 1,58 \frac{mg}{L} - Fe^{++}$$

$$1 \frac{mg}{L} - Cl_2 \text{ oxida } 0,77 \frac{mg}{L} - Mn^{++}$$

Estas reacciones son mucho más efectivas para aguas con pH y alcalinidad mayor de 8,0 y 50 mg/L respectivamente; aunque para un pH igual a 8,0 la reacción puede tardar entre dos o tres horas para su culminación (Cardenas & Castañeda, 2011).

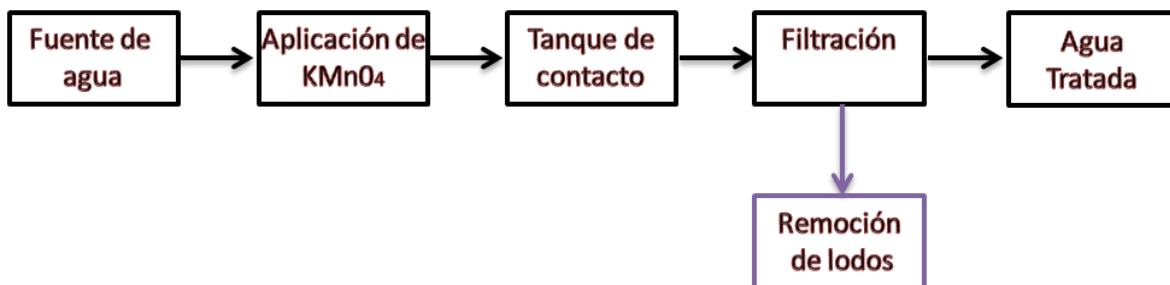
#### 4.2.2.2. Permanganato de Potasio

El Permanganato de potasio, ( $KMnO_4$ ) es un compuesto químico formado por iones potasio ( $K^+$ ) y permanganato ( $MnO_4^-$ ). Es un fuerte agente oxidante. Tanto sólido como en solución acuosa presenta un color violeta intenso. (EcuRed, 2015)

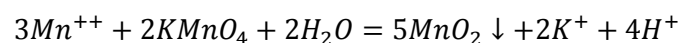
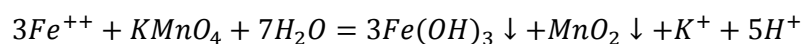
##### 4.2.2.2.1. Oxidación química mediante permanganato de potasio

Al igual que la oxidación con cloro es un proceso de oxidación-filtración que consiste en la dosificación de permanganato de potasio seguida de sedimentación y filtración. La remoción del precipitado de hierro y manganeso, como se muestra en la **Figura 4-2**. (HDR Engineering, 2001).

**FIGURA 4-2 OXIDACIÓN QUÍMICA MEDIANTE PERMANGANATO**



La oxidación química de hierro y manganeso con permanganato de potasio se pueden representar mediante las siguientes ecuaciones (Romero Rojas, 2009)



De estas ecuaciones se obtienen los siguientes resultados:

$$1 \frac{mg}{L} - KMnO_4 \text{ oxida } 1,06 \frac{mg}{L} - Fe^{++}$$
$$1 \frac{mg}{L} - KMnO_4 \text{ oxida } 0,52 \frac{mg}{L} - Mn^{++}$$

Para una mejor remoción del precipitado de hierro se debe tener un pH mayor o igual a 7,5, y para el manganeso un pH mayor a 9,0.

Debido a que el permanganato tiene un color rosado intenso, no es aconsejable utilizarlo en grandes cantidades ya que el agua tratada tomaría un color de la misma tonalidad del permanganato.

Estos procesos de oxidación hacen que el hierro ferroso soluble sea oxidado en hidróxido férrico insoluble y de igual manera que el manganoso se oxide a su forma mangánica. De esta forma tanto el hierro como el manganeso son removibles por sedimentación y filtración. (Cardenas & Castañeda, 2011).

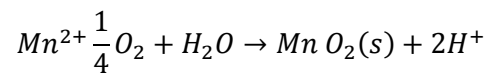
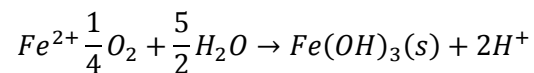
#### **4.2.2.3. Ozono**

El uso de ozono con el solo propósito de oxidar el Hierro y Manganeso no es muy utilizado, debido a la disponibilidad y los altos costos en la aplicación de esta tecnología en países como Colombia.

#### **4.2.3. Sistemas de Aireación**

La aireación se lleva a cabo para cumplir dos propósitos, transferir oxígeno (oxígeno disuelto) al agua mejorando sus características físico-químicas y organolépticas como olor, sabor y coloración, igualmente, remover gases como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>. (AWWA, 2002) y también es usado para remover químicos carcinogénicos como trihalometanos, radón, tricloroetileno, tetracloroetileno, tricloroetano, cloroformo y tolueno. (Loaiza Duque, 2009).

La rapidez de la oxidación del hierro ferroso por el oxígeno depende de varios factores, en especial: temperatura, pH, contenidos de Hierro y de oxígeno disuelto. La reacción será tanto más rápida cuando se sube el pH y cuanto más próxima esté el agua a la saturación de oxígeno. (AWWA, 2002, Jerry, 2008). El Fe(II) y Mn(II) disueltos en el agua se oxidan con el oxígeno bajo condiciones adecuadas a sus formas precipitadas de hidróxido férrico y el dióxido de manganeso, representadas en las siguientes ecuaciones (AWWA, 2002):



La mayoría de aplicaciones y sistemas de tratamiento con aireación se pueden describir mediante la ecuación de equilibrio de la Ley de Henry. Teóricamente 1 mg/L de O<sub>2</sub> oxida 7 mg/L de hierro divalente y 3.4 mg/L de manganeso divalente. La velocidad de oxidación es función del pH del agua, siendo más rápida a valores de pH mayores de 7 (Loaiza Duque, 2009).

Existen diferentes formas de transferencia de oxígeno al agua, las cuales pueden ser naturales como el contacto del aire con las masas de agua de los ríos, lagos, embalses y artificiales como los que se describen a continuación:

#### **4.2.3.1. Columna de percolación:**

Consisten en la introducción de agua en la parte superior de una columna a través de un distribuidor de agua, desde donde se deja fluir por gravedad sobre un material de relleno (Niples, anillos de PVC o rosetas). El material de relleno proporciona una gran superficie de contacto interfacial aire-agua, que da una eficiente remoción de gases como CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S propiciando la oxidación de los minerales. (Loaiza Duque, 2009).

#### **4.2.3.2. Bandejas de aireación:**

Presentan el mismo principio de transferencia de oxígeno que las columnas de percolación mediante el sistema tipo cascada o de caída. Las bandejas de aireación presentan una eficiencia de remoción entre 30 y 60% para CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S cuando el pH se encuentra cercano a 7 (AWWA, 2002).

#### **4.2.3.3. Aireación Difusa o de burbuja:**

El proceso de aireación difusa o de burbuja consiste en poner en contacto el agua con el aire mediante mecanismos de chorro o finas burbujas impulsados por equipos mecánicos denominados aireadores, los cuales se instalan en pozos o tanques especiales con el propósito de transferir el gas al agua como O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> o de remover gases volátiles del agua. (Loaiza Duque, 2009).

#### **4.2.3.4. Aireación de superficie:**

La aireación de superficie consiste en la utilización de un cilindro rotatorio semisumergido en el agua tipo cepillo o tipo turbina, el cual lanza el agua al girar el cilindro propiciando el contacto del agua con el aire, utilizado principalmente para absorción de oxígeno y gases volátiles. Los equipos utilizados presentan altos costos de energía y mantenimiento. (Loaiza Duque, 2009).

#### **4.2.3.5. Aireadores por Rociado:**

Los sistemas de aireadores por rociado han sido utilizados para remover hierro y manganeso en aguas subterráneas, constan de una serie de boquillas finas presurizadas colocadas sobre una red de tuberías, las cuales rocían el agua creando una gran superficie de transferencia de masa de agua-aire.

Igualmente estos equipos requieren consumo de energía y una constante operación y mantenimiento de los mismos. El propósito de utilizar un sistema que transfiere aire al agua es el de incrementar la concentración de oxígeno disuelto a niveles superiores de 4 mg/L (norma técnica colombiana NTC 4705), igualmente el oxígeno disuelto mejora el sabor, olor

y coloración al agua subterránea, adicionalmente, con la remoción de gases disueltos como el dióxido de carbono se incrementa el pH del agua favoreciendo la oxidación del Fe y Mn superior al 95% y 70% respectivamente. (Loaiza Duque, 2009).

#### **4.2.4. Oxidación Biológica**

El Hierro y Manganese también pueden ser removidos por oxidación biológica. 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.

La principal característica del metabolismo bacteriano es su naturaleza catalítica, por la cual se puede lograr una oxidación rápida del Hierro y el Manganese, y su precipitación. Para la remoción biológica de Hierro, el rango de pH óptimo está entre 6,5 y 7,2 y el potencial redox (POR) debe estar comprendido entre 100 y 400 mV (Jerry, 2008). Por otra parte, la concentración de oxígeno disuelto óptima para el Hierro es baja, ya que las bacterias involucradas son microaerófilas.

El tratamiento de oxidación biológica funciona bajo condiciones de flujo libre, requiere de tiempos de retención altos, bajas velocidades de filtración, para que se garantice la formación de las biopelículas donde puedan crecer eficientemente los microorganismos (Loaiza Duque, 2009).

### **4.3. ALMIDÓN DE MAÍZ**

El almidón se encuentra en abundancia en el reino vegetal, constituye la mayor reserva de carbohidratos de las plantas, y puede ser extraído de su fuente con relativa facilidad.

La **Tabla 4-1** muestra algunos datos sobre la composición media de variedades comunes de maíz. (Campos & Di Bernardo , 2000)

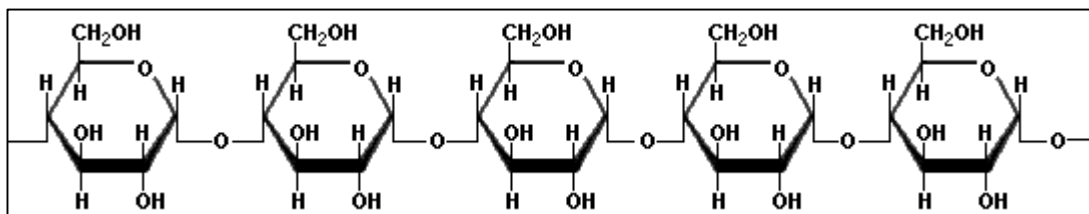
**TABLA 4-1 COMPOSICIÓN DEL ALMIDÓN DE MAÍZ**

Componente	Composición %
Almidón	55.5
Proteínas	8.2
Fibras	2.4
Ceniza	1.5

### 4.3.1. Componentes del almidón

El almidón es una mezcla de dos sustancias: amilosa, un polisacárido esencialmente lineal, y amilopectina, un polisacárido con una estructura muy ramificada. Las dos formas de almidón son polímeros de  $\alpha$ -D-Glucosa. Los almidones naturales contienen 10-20% de amilosa y 80-90% de amilopectina. La amilosa forma una dispersión coloidal en agua caliente que ayuda a espesar caldos o salsas, mientras que la amilopectina es completamente insoluble.

- Las moléculas de **amilosa** consisten típicamente de 200 a 20,000 unidades de glucosa que se despliegan en forma de hélix como consecuencia de los ángulos en los enlaces entre las moléculas de glucosa.

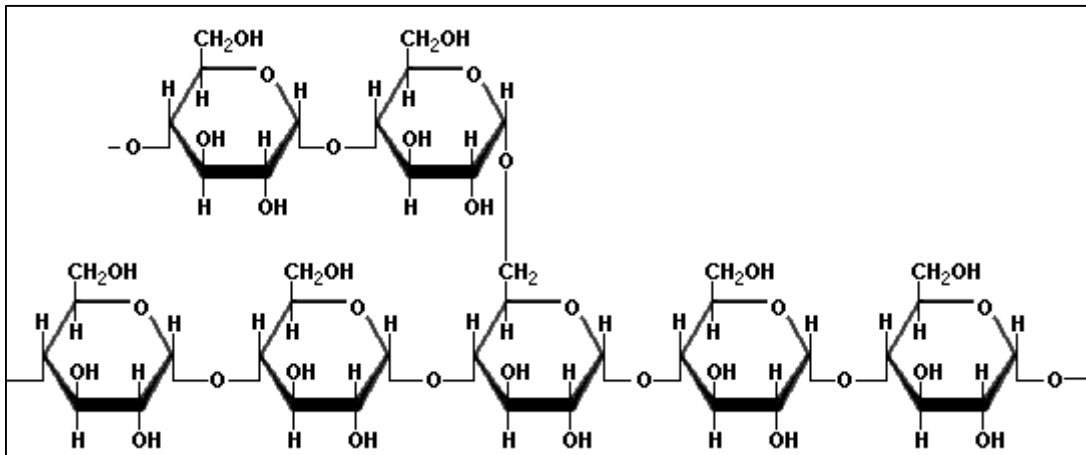


**FIGURA 4-3 AMILOSOSA**

- La **amilopectina** se distingue de la amilosa por ser muy ramificada. Cadenas laterales cortas conteniendo aproximadamente 30 unidades de glucosa se unen con enlaces  $1\alpha \rightarrow 6$  cada veinte o treinta unidades de glucosa a lo largo de las cadenas



principales. Las moléculas de amilopectina pueden contener hasta dos millones de unidades de glucosa.



**FIGURA 4-4 AMILOPECTINA**

#### **4.4. ENSAYO DE TRATABILIDAD**

Se realiza mediante ensayo de jarras con sedimentación y filtración, supone las siguientes etapas:

1. Coagulación (mezcla rápida): Proceso de desestabilización de las partículas suspendidas de modo que se aumente la fuerza de atracción entre ellas.
2. Floculación (mezcla lenta): Formación de puentes químicos entre partículas de modo que se forme una malla de coágulo o "floc" lo suficientemente grande y pesada para ser sedimentada.
3. Sedimentación: Es el proceso por el cual el "floc" es transportado al fondo del recipiente por acción de la gravedad.
4. Filtración: al proceso de separación de sólidos en suspensión en un líquido mediante un medio poroso, para este trabajo se utilizó filtros de arena.

Procedimiento:

- Se miden seis porciones de un litro de muestra cada una, se colocan en el equipo de jarras.

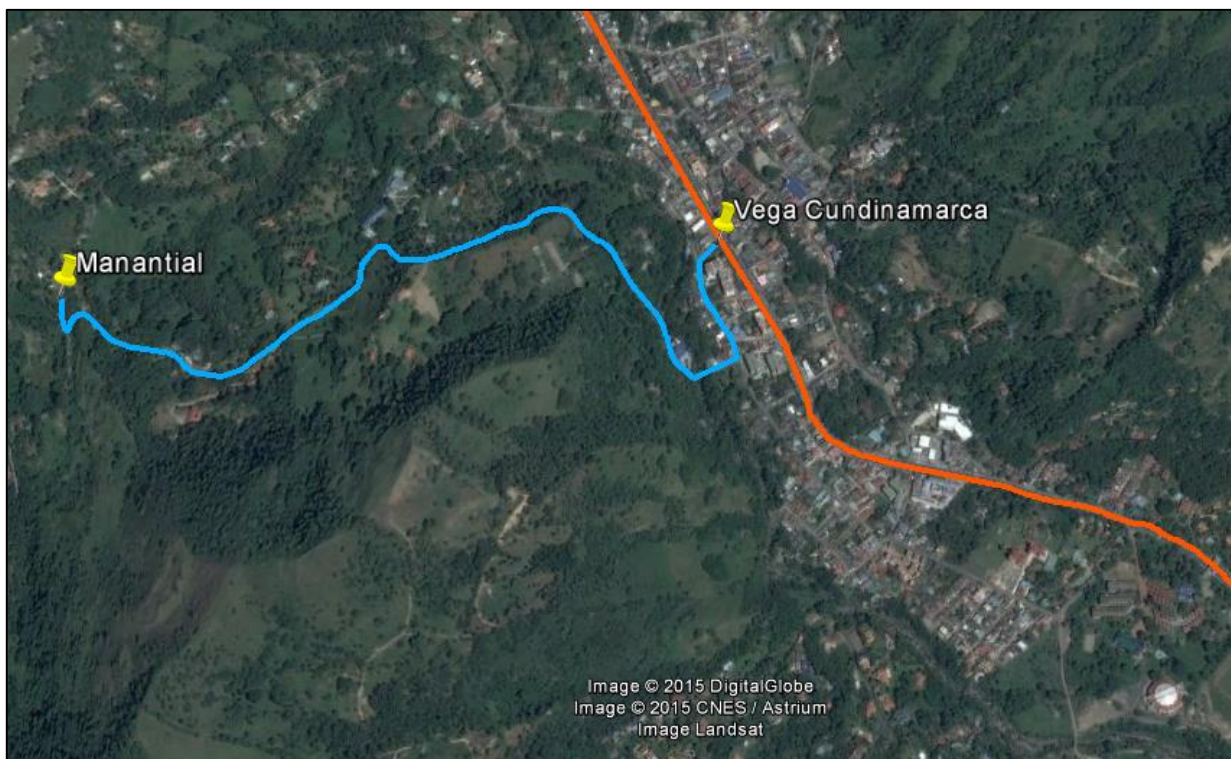
- Se dosifica el coagulante simultáneamente en cada una de las jarra en cantidades crecientes.
- Se agita la mezcla a alta velocidad (mezcla rápida) para garantizar una mezcla homogénea.
- Se disminuye la velocidad (mezcla Lenta)
- Una vez trascurrido la mezcla rápida y lenta se deja reposa por un tiempo para dejar sedimentar el “floc” formado.
- Culminando el periodo de sedimentación se escoge la jarra que mejor color y “floc” presente para determinar la dosificación óptima.
- Finalmente se filtra por medio de arena, removiendo los sólidos suspendidos restantes en el proceso de coagulación y sedimentación. (Cardenas & Castañeda, 2011)

## CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA

Se llevó a cabo ensayos de laboratorio para conocer las características del agua cruda, pruebas de jarras con diferentes coagulantes para establecer la eficiencia de cada uno y para conocer las características del agua tratada.

### 5.1. MUESTRAS

Las muestras del agua cruda fueron tomadas del manantial de la finca la Margarita ubicado a un kilómetro de la cabecera municipal de La Vega departamento de Cundinamarca (Figura 5-1).



**FIGURA 5-1 LOCALIZACIÓN DEL MANANTIAL**

Las muestras fueron tomadas directamente del manantial y almacenadas en recipientes plásticos cumpliendo con las normas establecidas para toma de muestras. (**Fotografía 5-1**)



**FOTOGRAFÍA 5-1**  
**MUESTRA MANANTIAL LA VEGA**

## **5.2. MÉTODO DE ANÁLISIS**

En la **Tabla 5-1** se presentan los métodos estándares de los ensayos realizados para la caracterización del agua.

**TABLA 5-1 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS MEDIDOS EN EL LABORATORIO**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Método de análisis</b>	<b>Satandard Methods</b>
<b>Color</b>	UPC	Visual	2120B
<b>Conductividad</b>	$\mu\text{S/cm}$	Instrumental	2520B
<b>Turbiedad</b>	UNT	Nefelométrico	2130B
<b>pH</b>	Unidades	Electrométrico	4500-H+B
<b>Alcalinidad</b>	$\text{mg/L-CaCO}_3$	Titulación	2320B
<b>Acidez</b>	$\text{mg/L}$	Titulación	2310B
<b>Dureza</b>	$\text{mg/L-CaCO}_3$	EDTA	2340 C
<b>Calcio</b>	$\text{mg/L-CaCO}_3$	EDTA	3500 - Ca D
<b>Hierro</b>	$\text{mg/L-Fe}$	Fenantrolina	3500 - Fe D
<b>Manganeso</b>	$\text{mg/L-Mn}$	Persulfato	3500 - Mn B
<b>Nitrógeno Amoniacal</b>	$\text{mg/L-N}$	Nesslerización	SM 16a edición - 417 B
<b>Nitritos</b>	$\text{mg/L-N}$	Colorímetro	4500 - NO <sub>2</sub> B
<b>Nitratos</b>	$\text{mg/L-N}$	Ácido Fenol Disulfónico	SM 12a edición
<b>Fluoruros</b>	$\text{mg/L-F}^-$	SPADNS	4500 - F-D
<b>Cloruros</b>	$\text{mg/L-Cl}^-$	Argentrométrico	4500 - Cl <sup>-</sup> B
<b>Sulfatos</b>	$\text{mg/L-SO}_4$	Turbidimétrico	4500 SO <sub>4</sub> E

### 5.3. ENSAYOS DE JARRAS

Para la evaluación de los coagulantes se siguió el procedimiento de “Ensayo de jarras”. Este procedimiento fue desarrollado para estudiar el efecto del tratamiento químico, se utiliza para hallar la dosificación óptima de coagulante para la clarificación del agua. En este trabajo se utiliza para determinar la dosis óptima de los diferentes métodos de tratamiento analizados para la remoción de hierro.

El ensayo de jarras consiste, en la preparación de seis litros de agua cruda. El agua se dispensa en seis jarras (un litro por jarra) y se inicia con una agitación de 100 rpm durante 30 segundos para la adición del coagulante (mezcla rápida). Transcurrido este periodo se

agitación a 40 rpm durante 15 minutos (mezcla lenta); una vez cumplido este lapso de agitación se deja en reposo por 15 minutos (sedimentación). **Fotografía 5-2**



**FOTOGRAFÍA 5-2**  
**ENSAYO DE JARRAS**

Después del periodo de reposo y dependiendo de la calidad visual de la muestra se realiza el proceso de filtración con ayuda de un filtro de arena.

A las muestras filtradas se les miden los parámetros de color, turbiedad, pH y conductividad, y dependiendo del resultado a las mejores se le hace hierro.

Para los ensayos de jarras se prepararon soluciones de alumbre, almidón, cal y cloruro férrico con una concentración de 10mg/mL

## CAPÍTULO 6. RESULTADOS

### 6.1. AGUA CRUDA

En la **Tabla 6-1** se incluye la caracterización del agua cruda de las muestras de febrero 2 y abril 25 de 2015.

**TABLA 6-1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA CRUDA**

Análisis Físico Químico					
Parámetro	Unidad	Muestra feb 2/2015	Muestra abril 2/2015	Valores máximos Resolución 2115	Cumple / No Cumple
<b>Color</b>	UPC	45	35	15	No cumple
<b>Conductividad</b>	μS/cm	119,1	82,3	1000	Cumple
<b>Turbiedad</b>	UNT	20,9	56	2	No cumple
<b>pH</b>	Unidades	5,9	5,7	6,5-9,0	No cumple
<b>Alcalinidad</b>	mg/L- CaCO <sub>3</sub>	36	24	200	Cumple
<b>Acidez</b>	mg/L	48	36	-	-
<b>CO<sub>2</sub></b>	mg/L	42,2	31,7	-	-
<b>Dureza</b>	mg/L- CaCO <sub>3</sub>	38	44	300	Cumple
<b>Calcio</b>	mg/L- CaCO <sub>3</sub>	24	32	60	Cumple
<b>Hierro</b>	mg/L-Fe	6,2	8	0,3	No cumple
<b>Manganeso</b>	mg/L-Mn	0	0	0,1	Cumple
<b>Nitrógeno Amoniacal</b>	mg/L-N	0,2	0,3	-	-
<b>Nitritos</b>	mg/L-N	0	0	0,1	Cumple
<b>Nitratos</b>	mg/L-N	0	0	10	Cumple
<b>Fluoruros</b>	mg/L-F	0	0	1	Cumple
<b>Cloruros</b>	mg/L-Cl	6,1	1	250	Cumple
<b>Sulfatos</b>	mg/L-S O <sub>4</sub>	26,3	18	250	Cumple

## 6.2. ENSAYOS DE JARRAS

Se realizaron en total 17 ensayos de jarras con diferentes coagulantes, dichos resultados se relacionan en las **Tabla 6-2** a la **Tabla 6-18**.

**TABLA 6-2 ENSAYO DE JARRAS CON ALUMBRE**

Ensayo:		1					
Fecha:		18/02/2015					
Mezcla rápida: 30 s		Mezcla Lenta: 15 min			Sedimentación: 15 min		
PARÁMETRO	Agua Cruda	JARRAS					
		1	2	3	4	5	6
ALUMBRE	mg/L	50	100	150	200	250	300
	mL	5	10	15	20	25	30
pH		5,47					
Color (UPC)		175					
Turbiedad (UNT)		128					
Conductividad (µmho/cm)		92,1					
Hierro		6,24					
Observaciones		Se rechazaron las 6 jarras porque no presentaron un floc adecuado					

**TABLA 6-3 ENSAYO DE JARRAS CON ALUMBRE**

Ensayo:		2					
Fecha:		18/02/2015					
Mezcla rápida: 30 s		Mezcla Lenta: 15 min			Sedimentación: 15 min		
PARÁMETRO	Agua Cruda	JARRAS					
		1	2	3	4	5	6
ALUMBRE	mg/L	10	15	20	25	30	35
	mL	1	1,5	2	2,5	3	3,5
pH		5,47					
Color (UPC)		175					
Turbiedad (UNT)		128					
Conductividad (µmho/cm)		92,1					
Hierro		6,24					
Observaciones		Se rechazaron las 6 jarras porque no presentaron un floc adecuado					



**TABLA 6-4 ENSAYO DE JARRAS CON ALUMBRE Y CAL**

Ensayo:		3						
Fecha:		19/02/2015						
Mezcla rápida:		30 s			Mezcla Lenta: 15 min		Sedimentación: 15 min	
PARÁMETRO	Agua Cruda	JARRAS						
		1	2	3	4	5	6	
ALUMBRE	mg/L	30	40	50	60	70	80	
	mL	3	4	5	6	7	8	
CAL	mg/L	10	14	17	20	24	27	
	mL	1	1,4	1,7	2	2,4	2,7	
pH		5,88						
Color (UPC)		200						
Turbiedad (UNT)		197						
Conductividad (µmho/cm)		89,3						
Hierro		6,24						
Observaciones		Se rechazaron las 6 jarras porque no presentaron un floc adecuado						

**TABLA 6-5 ENSAYO DE JARRAS CON ALUMBRE Y CAL**

Ensayo:		4						
Fecha:		19/02/2015						
Mezcla rápida:		30 s			Mezcla Lenta: 15 min		Sedimentación: 15 min	
PARÁMETRO	Agua Cruda	JARRAS						
		1	2	3	4	5	6	
ALUMBRE	mg/L	40	50	60	70	80	90	
	mL	4	5	6	7	8	9	
CAL	mg/L	20	25	30	35	40	45	
	mL	2	2,5	3	3,5	4	4,5	
pH		5,76						
Color (UPC)		125						
Turbiedad (UNT)		123						
Conductividad (µmho/cm)		96,2						
Hierro		6,24						
Observaciones		No presento buen floc (rechazada)	No presento buen floc (rechazada)	Floc aceptable	Floc aceptable	Floc aceptable	Floc aceptable	

**TABLA 6-6 ENSAYO DE JARRAS CON ALUMBRE Y CAL**

Ensayo:		5						
Fecha:		19/02/2015						
Mezcla rápida:		30 s			Mezcla Lenta: 15 min		Sedimentación: 15 min	
PARÁMETRO	Agua Cruda	JARRAS						
		1	2	3	4	5	6	
ALUMBRE	mg/L	60	60	60	60	60	60	
	mL	6	6	6	6	6	6	
CAL	mg/L	30	35	40	45	50	55	
	mL	3	3,5	4	4,5	5	5,5	
pH		5,76						
Color (UPC)		125						
Turbiedad (UNT)		123						
Conductividad (µmho/cm)		96,2						
Hierro		6,24						
Observaciones		Todas presentaron buen floc, visualmente las mejores jarras fueron las 5 y 6						

**TABLA 6-7 ENSAYO DE JARRAS CON ALMIDÓN**

Ensayo:		6					
Fecha:		20/02/2015					
Mezcla rápida: 30 s		Mezcla Lenta: 15 min			Sedimentación: 15 min		
PARÁMETRO	Agua Cruda	JARRAS					
		1	2	3	4	5	6
ALMIDON	mg/L	50	100	150	200	250	300
	mL	5	10	15	20	25	30
pH	6,32	5,78	5,88	5,74	5,71	5,75	5,75
Color (UPC)	125	20	15	15	15	15	15
Turbiedad (UNT)	154	8,34	7,77	8,48	7,82	8,04	7,71
Conductividad (µmho/cm)	88,4						
Hierro	6,24						
Observaciones	Todas presentaron floc muy fino						

**TABLA 6-8 ENSAYO DE JARRAS CON ALMIDÓN**

Ensayo:		7					
Fecha:		27/04/2015					
Mezcla rápida: 30 s		Mezcla Lenta: 15 min			Sedimentación: 15 min		
PARÁMETRO	Agua Cruda	JARRAS					
		1	2	3	4	5	6
ALMIDON	mg/L	50	60	70	80	90	100
	mL	5	6	7	8	9	10
pH	5,74						
Color (UPC)	175						
Turbiedad (UNT)	56						
Conductividad (µmho/cm)	82,3						
Hierro	8,02						
Observaciones	Se rechazaron las 6 jarras porque no presentaron un floc adecuado						

**TABLA 6-9 ENSAYO DE JARRAS CON ALMIDÓN**

Ensayo:		8					
Fecha:		27/04/2015					
Mezcla rápida: 30 s		Mezcla Lenta: 15 min			Sedimentación: 15 min		
PARÁMETRO	Agua Cruda	JARRAS					
		1	2	3	4	5	6
ALMIDON	mg/L	80	100	120	140	160	180
	mL	8	10	12	14	16	18
pH	5,74						
Color (UPC)	175						
Turbiedad (UNT)	56						
Conductividad (µmho/cm)	82,3						
Hierro	8,02						
Observaciones	Se rechazaron las 6 jarras porque no presentaron un floc adecuado						

**TABLA 6-10 ENSAYO DE JARRAS CON ALMIDÓN**

Ensayo: 9							
Fecha: 28/04/2015		Mezcla Lenta: 15 min			Sedimentación: 15 min		
Mezcla rápida: 30 s							
PARÁMETRO	Agua Cruda	JARRAS					
		1	2	3	4	5	6
ALMIDON	mg/L	100	200	300	400	500	600
	mL	10	20	30	40	50	60
pH	5,91	5,48	5,37	5,42	5,35	5,46	5,48
Color (UPC)	75	10	15	15	15	15	15
Turbiedad (UNT)	221	30,7	34,3	35,2	36,9	37,7	41,70
Conductividad (µmho/cm)	78,4	125,4					
Hierro	8,02	1,73					1,24
Observaciones	Si presenta coagulación pero tiene problemas en la sedimentación , debido a que el floc es muy fino. La jarra 6 es la que presenta mejor sobrenadante.						

**TABLA 6-11 ENSAYO DE JARRAS CON ALMIDÓN Y CAL**

Ensayo: 10							
Fecha: 28/04/2015		Mezcla Lenta: 15 min			Sedimentación: 15 min		
Mezcla rápida: 30 s							
PARÁMETRO	Agua Cruda	JARRAS					
		1	2	3	4	5	6
ALMIDON	mg/L	100	100	100	100	100	100
	mL	10	10	10	10	10	10
CAL	mg/L	10	20	30	40	50	60
	mL	1	2	3	4	5	6
pH	5,86	6,64	7,41	7,88	8,89	8,89	8,33
Color (UPC)	50	10	15	15	20	20	25
Turbiedad (UNT)	220	31,6	42,5	47,2	55,1	58,9	59,20
Conductividad (µmho/cm)	86	111,2					
Hierro	8,02	2,21		2,05			
Observaciones	Si presenta coagulación pero tiene problemas en la sedimentación , debido a que el floc es muy fino.						

**TABLA 6-12 ENSAYO DE JARRAS CON ALMIDÓN, CAL Y ALUMBRE**

Ensayo:		11					
Fecha:		29/04/2015					
Mezcla rápida: 30 s		Mezcla Lenta: 15 min			Sedimentación: 15 min		
PARÁMETRO	Agua Cruda	JARRAS					
		1	2	3	4	5	6
ALMIDON	mg/L	100	100	100	100	100	100
	mL	10	10	10	10	10	10
CAL	mg/L	20	20	20	20	20	20
	mL	2	2	2	2	2	2
ALUMBRE	mg/L	10	20	30	40	50	60
	mL	1	2	3	4	5	6
pH	5,96	7,4	6,4	6,07	5,6	5,31	5,13
Color (UPC)	50	5	5	10	10	10	10
Turbiedad (UNT)	163	3,69	1,9	13	13,5	13,1	11,70
Conductividad (µmho/cm)	88,5	126,1	119,7	116,3	118,4	115,8	120,8
Hierro	8,02	0,00	0,00	0,44	0,00	0,00	0,11
Observaciones	Todas presentaron un floc muy fino pero mejoró su sedimentación, la jarra 2 es la que presenta mejor floc y sedimentación						

**TABLA 6-13 ENSAYO DE JARRAS CON ALMIDÓN Y CLORURO FÉRRICO**

Ensayo:		12					
Fecha:		29/04/2015					
Mezcla rápida: 30 s		Mezcla Lenta: 15 min			Sedimentación: 15 min		
PARÁMETRO	Agua Cruda	JARRAS					
		1	2	3	4	5	6
ALMIDON	mg/L	100	100	100	100	100	100
	mL	10	10	10	10	10	10
Fe Cl <sub>3</sub>	mg/L	10	20	30	40	50	60
	mL	1	2	3	4	5	6
pH	5.96	5.58	4.83				
Color (UPC)	50	10	5				
Turbiedad (UNT)	163	0.96	0.88				
Conductividad (µmho/cm)	88.5	89.5	94.6				
Hierro	8.02	0.11	0.20				
Observaciones		Presentaron buen floc y sedimentación		No presentaron floc (rechazada)			

**TABLA 6-14 ENSAYO DE JARRAS CON CLORURO FÉRRICO**

Ensayo:		13					
Fecha:		30/04/2015					
Mezcla rápida: 30 s		Mezcla Lenta: 15 min			Sedimentación: 15 min		
PARÁMETRO	Agua Cruda	JARRAS					
		1	2	3	4	5	6
Fe Cl <sub>3</sub>	mg/L	20	30	40	50	60	70
	mL	2	3	4	5	6	7
pH	5.83						
Color (UPC)	75						
Turbiedad (UNT)	84.9						
Conductividad (µmho/cm)	84.8						
Hierro	8.02						
Observaciones	La única que presento floc fue la primera pero demasiado fino y las jarras presentaban mucho color						

**TABLA 6-15 ENSAYO DE JARRAS CON CLORURO FÉRRICO Y CAL**

Ensayo:		14					
Fecha:		30/04/2015					
Mezcla rápida: 30 s		Mezcla Lenta: 15 min			Sedimentación: 15 min		
PARÁMETRO	Agua Cruda	JARRAS					
		1	2	3	4	5	6
Fe Cl <sub>3</sub>	mg/L			10	10	20	20
	mL			1	1	2	2
CAL	mg/L			10	20	10	20
	mL			1	2	1	2
pH	5.83			5.58	5.77	5.32	5.83
Color (UPC)	50			10	10	10	10
Turbiedad (UNT)	84.9			1.64	1.65	1.9	1.71
Conductividad (µmho/cm)	84.8			96.7	104	105.1	127.4
Hierro	8.02			0.11	0.00	0.28	0.00
Observaciones	Presentaron buen floc y sedimentación						

**TABLA 6-16 ENSAYO DE JARRAS CON CAL**

Ensayo:		15					
Fecha:		4/5/2015					
Mezcla rápida: 30 s		Mezcla Lenta: 15 min			Sedimentación: 15 min		
PARÁMETRO	Agua Cruda	JARRAS					
		1	2	3	4	5	6
CAL	mg/L	20	30	40	50	60	70
	mL	2	3	4	5	6	7
pH	5,87						
Color (UPC)	50						
Turbiedad (UNT)	108						
Conductividad (µmho/cm)	86,4						
Hierro	8,02						
Observaciones	Si presenta floc pero demasiado fino, no sedimenta						

**TABLA 6-17 ENSAYO DE JARRAS CON CAL**

Ensayo:		16						
Fecha:		4/5/2015						
Mezcla rápida: 30 s		Mezcla Lenta: 15 min			Sedimentación: 15 min			
PARÁMETRO		Agua Cruda	JARRAS					
			1	2	3	4	5	6
CAL	mg/L		10	100	200			
	mL		1	10	20			
pH		5,87						
Color (UPC)		50						
Turbiedad (UNT)		108						
Conductividad (µmho/cm)		86,4						
Hierro		8,02						
Observaciones		Si presenta floc pero demasiado fino, no sedimenta						

**TABLA 6-18 ENSAYO DE JARRAS CON CLORURO FÉRRICO Y CAL**

Ensayo:		17						
Fecha:		4/5/2015						
Mezcla rápida: 30 s		Mezcla Lenta: 15 min			Sedimentación: 15 min			
PARÁMETRO		Agua Cruda	JARRAS					
			1	2	3	4	5	6
Fe Cl <sub>3</sub>	mg/L		10	10	10	10	10	10
	mL		1	1	1	1	1	1
CAL	mg/L		30	40	50	60	70	80
	mL		3	4	5	6	7	8
pH		5.87	6.82	7.92	8.18	8.87	9.14	9
Color (UPC)		50	5	5	5	5	5	5
Turbiedad (UNT)		84.9	1.65	1.84	1.73	1.76	1.95	1.80
Conductividad (µmho/cm)		86.4	131.4	134.6	145.2	151.7	159.5	146.3
Hierro		8.02	0.00					
Observaciones		Todas presentaron buen floc y sedimentación						

### 6.3. FÍSICO QUÍMICO DEL AGUA TRATADA

Se realizaron tres (3) ensayos físico - químicos a las aguas tratadas con los mejores resultados, los valores obtenidos se relacionan en la **Tabla 6-19**.

**TABLA 6-19 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA TRATADA**

Análisis Físico Químico					
Parámetro	Unidad	Alumbre - Cal	Almidón - Alumbre - Cal	Fe CL <sub>3</sub> - Cal	Valores máximos Resolución 2115
Color	UPC	10	5	5	15
Conductividad	µmho/cm	151,3	119,7	131,4	1000
Turbiedad	UNT	1,2	1,9	1,65	2
pH	Unidades	6,65	6,4	6,82	6.5-9.0
Alcalinidad	mg/L-CaCO <sub>3</sub>	32	30	40	200
Acidez	mg/L	16	20	16	-
CO <sub>2</sub>	mg/L	14,08	17,6	14,08	-
Dureza	mg/L-CaCO <sub>3</sub>	80	74	72	300
Calcio	mg/L-CaCO <sub>3</sub>	70	54	56	60
Hierro	mg/L-Fe	0,00	0,00	0,11	0,30
Manganeso	mg/L-Mn	0,00	0,00	0,00	0,10
Nitrógeno Amoniacal	mg/L-N	0,21	0,19	0,19	-
Nitritos	mg/L-N	0,0036	0,0036	0,0036	0,10
Nitratos	mg/L-N	0,06	0,05	0,05	10
Fluoruros	mg/L-F	0,00	0,00	0,00	1,00
Cloruros	mg/L-Cl	0	0	0	250
Sulfatos	mg/L-SO <sub>4</sub>	0,00	0,00	0,00	250

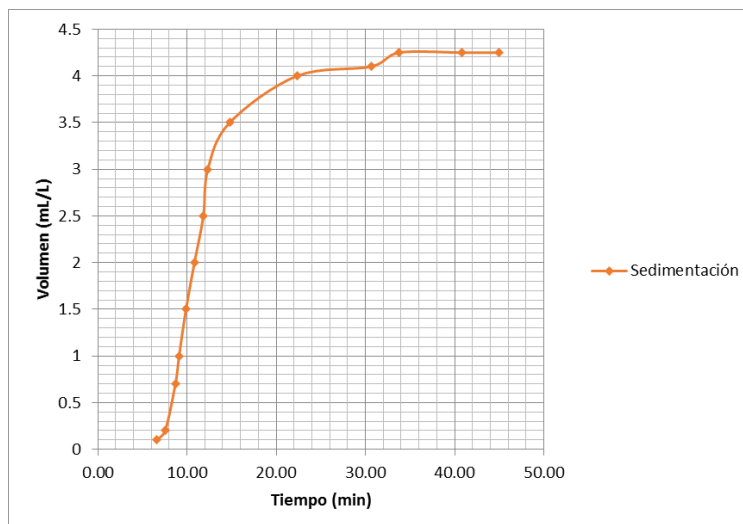
## 6.4. VOLUMEN DE SEDIMENTOS

Mediante el cono Imhoff, se obtiene el volumen de lodo sedimentado: los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 6-20** y en la **Figura 6-1**.

**TABLA 6-20 SÓLIDOS SEDIMENTABLES**

Tiempo (min)	Volumen (mL/L)
6,57	0,1
7,55	0,2
8,70	0,7
9,12	1
9,88	1,5
10,83	2
11,83	2,5
12,33	3
14,78	3,5
22,33	4
30,63	4,1
33,80	4,25
40,80	4,25
45,00	4,25

**FIGURA 6-1 SÓLIDOS SEDIMENTABLES**





## CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 7.1. AGUA CRUDA

En la **Tabla 6-1** se muestran los resultados de los ensayos físico- químicos del agua cruda. Se observa que el agua cruda tiene una concentración de hierro de 6,2 a 8 mg/L, lo cual excede la norma colombiana para agua potable (resolución 2115 de 2007) que establece como valor máximo aceptable 0,3 mg/L- Fe; lo cual indica que para cumplir con la norma colombiana se debe remover mínimo el 95,2%.

Se observa en la **Tabla 6-1** que el color, la turbiedad y el pH del agua cruda no cumplen con los valores aceptables por la norma colombiana de agua potable, 15 UPC, 2 UNT y 6,5 -9 de pH respectivamente.

### 7.2. AGUA TRATADA

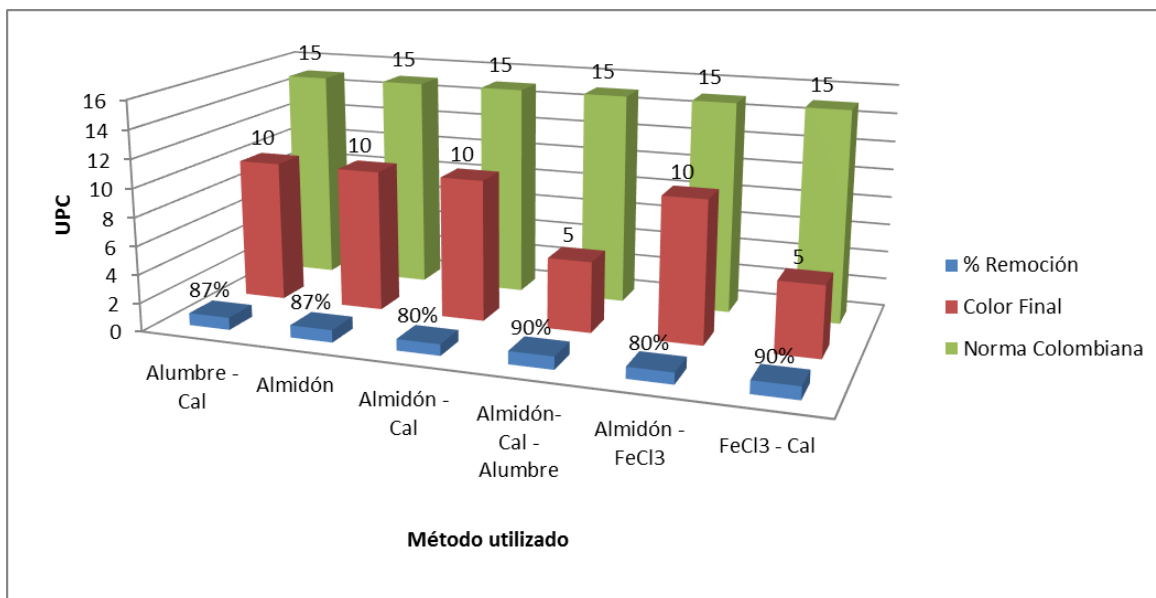
#### 7.2.1. Color

En la **Tabla 7-1** y en la **Figura 7-1** se muestra el color medido al final del ensayo de jarras y de la filtración para cada uno de los métodos de remoción. Se observa que los seis métodos de remoción usados permiten cumplir con la norma colombiana de agua potable (resolución 2115 de 2007). Para cumplir con la norma el método de remoción aplicado debe tener una remoción de color mayor del 95%.

Los tratamientos que presentan mejor resultado son almidón – cal – alumbre y cloruro férrico – cal que obtuvieron remociones de color del 90%.

**TABLA 7-1 COLOR AGUA TRATADA**

Método	Color Inicial	Color Final	% Remoción
Alumbre - Cal	75	10	87%
Almidón	75	10	87%
Almidón - Cal	50	10	80%
Almidón- Cal - Alumbre	50	5	90%
Almidón - FeCl <sub>3</sub>	50	10	80%
FeCl <sub>3</sub> - Cal	50	5	90%



**FIGURA 7-1 COLOR SEGÚN MÉTODO DE TRATAMIENTO**

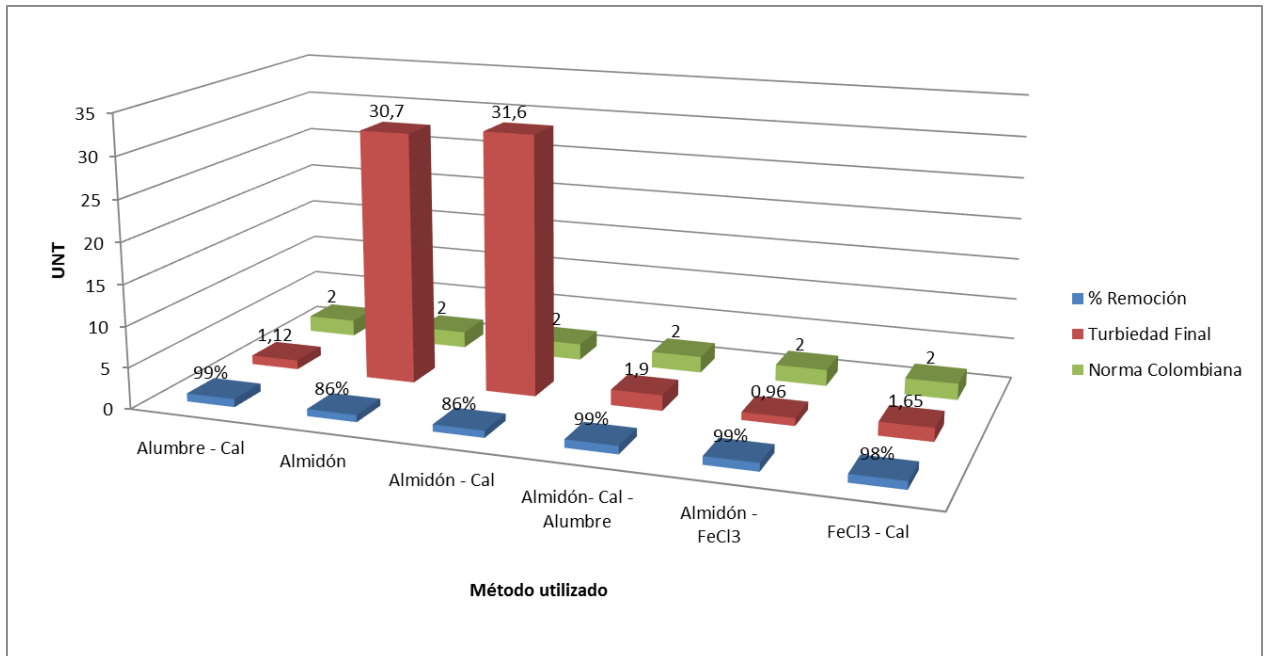
### 7.2.2. Turbiedad

En la **Tabla 7-2** y en la **Figura 7-2** se incluyen los resultados obtenidos para turbiedad. Se observa que cuatro de los seis métodos implementados para la remoción de hierro permiten cumplir con el valor máximo aceptable establecido por la norma colombiana de agua potable (resolución 2115 de 2007) para turbiedad.

Los tratamientos que presentaron mejores resultados fueron almidón - cal – alumbre y Almidón – cloruro férrico con una remoción de turbiedad del 99%

**TABLA 7-2 TURBIEDAD FINAL SEGÚN EL TIPO DE TRATAMIENTO**

Método	Turbiedad Inicial	Turbiedad Final	% Remoción
Alumbre - Cal	123	1,12	99%
Almidón	221	30,7	86%
Almidón - Cal	220	31,6	86%
Almidón- Cal - Alumbre	163	1,9	99%
Almidón - FeCl <sub>3</sub>	163	0,96	99%
FeCl <sub>3</sub> - Cal	84,9	1,65	98%



**FIGURA 7-2 TURBIEDAD SEGÚN MÉTODO DE TRATAMIENTO**

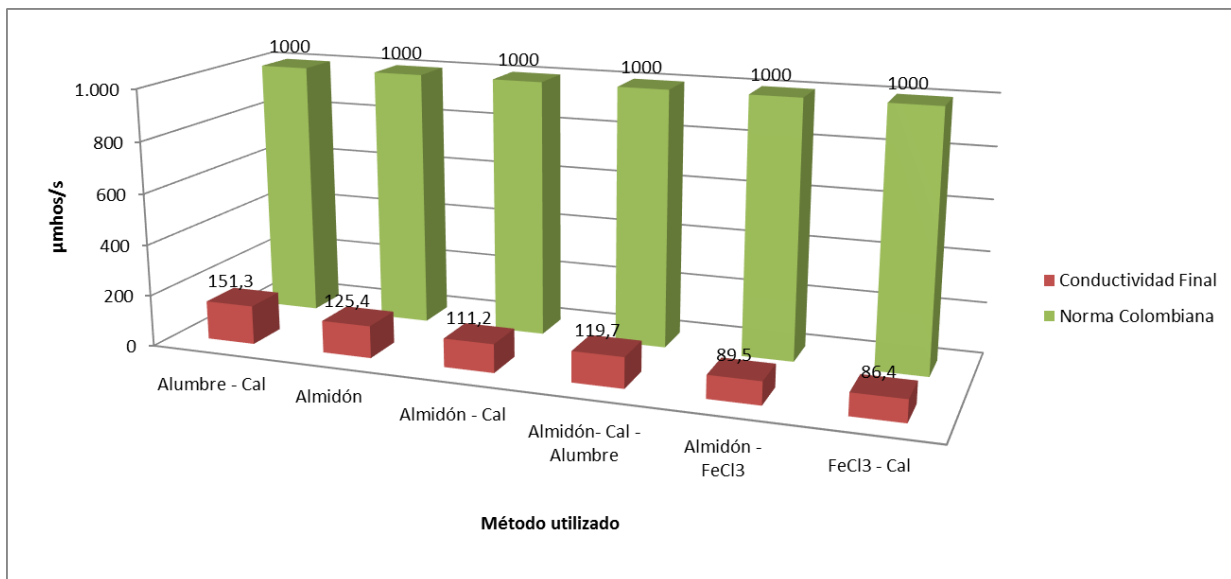
### 7.2.3. Conductividad

En la **Tabla 7-3** y en la **Figura 7-3** se muestra la conductividad del agua tratada. Se observa que los seis métodos utilizados para la remoción de hierro, permiten cumplir con el valor máximo aceptable establecido por la norma colombiana de agua potable (resolución 2115 de 2007) para conductividad.

El tratamiento con cloruro férrico - cal es el mejor en términos de la conductividad del agua tratada.

**TABLA 7-3 CONDUCTIVIDAD FINAL SEGÚN EL TIPO DE TRATAMIENTO**

Método	Conductividad Inicial	Conductividad Final
Alumbre - Cal	96,2	151,3
Almidón	78,4	125,4
Almidón - Cal	86	111,2
Almidón- Cal - Alumbre	88,5	119,7
Almidón - FeCl <sub>3</sub>	88,5	89,5
FeCl <sub>3</sub> - Cal	131,4	86,4



**FIGURA 7-3 CONDUCTIVIDAD SEGÚN MÉTODO DE TRATAMIENTO**

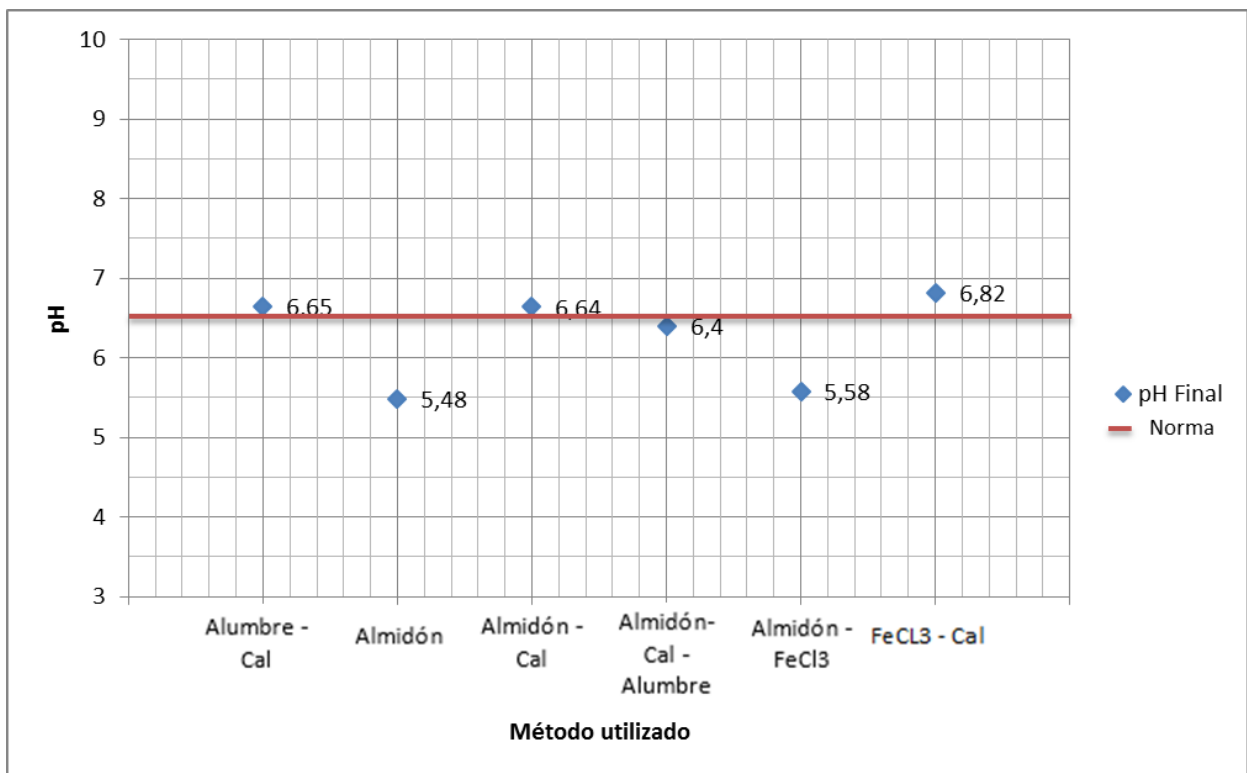
### 7.2.4. pH

En la **Tabla 7-4** y en la **Figura 7-4** se incluyen los valores de pH del agua tratada.

Los métodos, con cal, presentan mejores resultados en cuanto a pH se refiere. El método con mejor resultado de pH es el de cloruro férrico con cal.

**TABLA 7-4 pH FINAL SEGÚN EL MÉTODO DE TRATAMIENTO**

Método	pH Inicial	pH Final
Alumbre - Cal	5,76	6,65
Almidón	5,91	5,48
Almidón - Cal	5,86	6,64
Almidón- Cal - Alumbre	5,96	6,4
Almidón - FeCl <sub>3</sub>	5,96	5,58
FeCl <sub>3</sub> - Cal	5,87	6,82



**FIGURA 7-4 PH SEGÚN MÉTODO DE TRATAMIENTO**

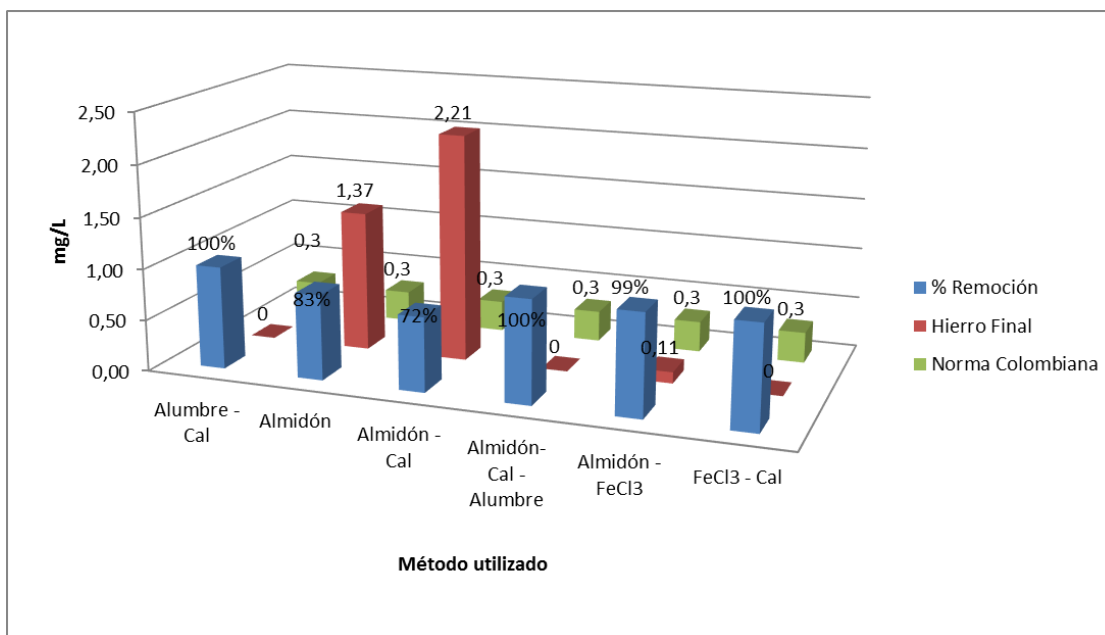
### 7.2.5. Hierro

En la **Tabla 7-5** y en la **Figura 7-5** se ven los valores del hierro del agua tratada. Se observa que cuatro de los seis métodos usados para remoción de hierro, permiten cumplir con el valor máximo aceptable establecido por la norma colombiana de agua potable (resolución 2115 de 2007).

En relación con el hierro los métodos con mejores tratamiento son alumbre – cal, almidón – cal – alumbre, y cloruro férrico – cal, los cuales permitieron obtener una remoción de hierro del 100%.

**TABLA 7-5 HIERRO FINAL SEGÚN EL TIPO DE TRATAMIENTO**

Método	Hierro Inicial	Hierro Final	% Remoción
Alumbre - Cal	6,24	0	100%
Almidón	8,02	1,37	83%
Almidón - Cal	8,02	2,21	72%
Almidón- Cal - Alumbre	8,02	0	100%
Almidón - FeCl <sub>3</sub>	8,02	0,11	99%
FeCl <sub>3</sub> - Cal	8,02	0	100%



**FIGURA 7-5 HIERRO SEGÚN MÉTODO DE TRATAMIENTO**

### 7.3. COMPARACIÓN ANÁLISIS FISICOQUÍMICO

**TABLA 7-6 RESULTADOS ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS AGUA TRATADA**

Comparación Físico Químico									
Parámetro	Unidad	Agua Cruda	Alumbre - Cal	Alumbre - Cal (Remoción)	Almidón - Alumbre - Cal	Almidón - Alumbre - Cal (Efectividad)	Fe CL <sub>3</sub> - Cal	Fe CL <sub>3</sub> - Cal (Efectividad)	Valores máximos Resolución 2115
Color	UPC	75	10	87%	5	93%	5	93%	15
Conductividad	µmho/cm	119.1	151.3	-	119.7	-	131.4	-	1000
Turbiedad	UNT	56	1.2	98%	1.9	97%	1.65	97%	2
pH	Unidades	5.9	6.65	-	6.4	-	6.82	-	6.5-9.0
Alcalinidad	mg/L- CaCO <sub>3</sub>	36	32	-	30	-	40	-	200
Acidez	mg/L	48	16	67%	20	58%	16	67%	-
CO <sub>2</sub>	mg/L	42.2	14.08	67%	17.6	58%	14.08	67%	-
Dureza	mg/L- CaCO <sub>3</sub>	44	80	-	74	-	72	-	300
Calcio	mg/L- CaCO <sub>3</sub>	32	70	-	54	-	56	-	60
Hierro	mg/L-Fe	8	0	100%	0	100%	0	100%	0.3
Manganeso	mg/L-Mn	0	0	-	0	-	0	-	0.1
Nitrógeno Amoniacal	mg/L-N	0.3	0.21	30%	0.19	37%	0.19	37%	-
Nitritos	mg/L-N	0	0.0036	-	0.0036	-	0.0036	-	0.1
Nitratos	mg/L-N	0	0.06	-	0.05	-	0.05	-	10
Fluoruros	mg/L-F	0	0	-	0	-	0	-	1
Cloruros	mg/L-Cl	6.1	0	100%	0	100%	0	100%	250
Sulfatos	mg/L-SO <sub>4</sub>	26.3	0	100%	0	100%	0	100%	250

En la **Tabla 7-6** se evidencia que los tres tratamientos seleccionados satisfacen el propósito de proveer agua tratada. En cuanto a hierro todos presentan una remoción del 100%, lo cual indica que todos cumplieron con el objetivo inicial.

#### 7.4. ANÁLISIS ECONÓMICO

En la **Tabla 7-7** se presenta el costo de los tres tratamientos seleccionados según la dosis de coagulante utilizados. El mejor tratamiento según su costo es el cloruro férrico - Cal, el cual presenta un costo de coagulación de 165 pesos por metro cúbico.

**TABLA 7-7 COSTO DE CADA TRATAMIENTO**

Tratamiento	Coagulante	Dosis (mg/L)	Dosis (Kg/m <sup>3</sup> )	Valor Kg/\$	Costo \$/ m <sup>3</sup>	Costo total \$/ m <sup>3</sup>
<b>Alumbre - Cal</b>	Alumbre	60	0.06	4500	270	445
	Cal	50	0.05	3500	175	
<b>Almidón - Cal - Alumbre</b>	Almidón	100	0.1	5000	500	660
	Cal	20	0.02	3500	70	
	Alumbre	20	0.02	4500	90	
<b>Fe CL<sub>3</sub> - Cal</b>	Fe CL <sub>3</sub>	10	0.01	6000	60	165
	Cal	30	0.03	3500	105	



## **CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES**

- Los tratamientos con alumbre - cal, almidón – cal – alumbre y cloruro férrico – cal, cumplen con el objetivo del proyecto, presentando una remoción de hierro del 100%.
- La combinación de costo mínimo es la de 10 mg/L de cloruro férrico con 30 mg/L de cal, con un costo de 165 pesos por metro cubico.
- La coagulación con almidón presenta una remoción de hierro de 83%, la cual no es suficiente para el cumplimiento de la norma Colombia.
- Se considera que los ensayos con almidón de maíz se deben continuar para diferentes tipos de aguas, ya sean superficiales (quebradas, ríos, embalses, ciénagas y lagos) o subterráneas, con el propósito de verificar la eficiencia y eficacia de este coagulante en diferentes condiciones de operación.

## CAPÍTULO 9. REFERENCIAS

- Adams, R. B. (1960). Manganese Removal by Oxidation With Potassium Permanganate. *Reprinted from and copyrighted as a part of journal american water works association*, 219-228.
- AWWA. (2002). *Calidad y Tratamiento del Agua*. McGraw-Hill. 5ta edición.
- Burbano, L. M. (2011). *Remoción de hierro y manganeso por oxidación con cloro y filtración en gravas*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Campos, J. R., & Di Bernardo, L. (2000). *Uso de polimeros naturales en el tratamiento de agua para abastecimiento*. Sao Paulo : Universidad de Sao Paulo - Escuela de ingeniería de Sao Carlos.
- Cardenas, K., & Castañeda, A. (2011). *Remoción de hierro en aguas con alta concentración*. Bogota : Escuela colombiana de ingeniería .
- Di, B., & Sabogal Paz. (2008). *Selección de tecnologías de tratamiento de agua*. Sao Carlos: LDIBE LTDA.
- EcuRed*. (2015, 08 19). Retrieved from *EcuRed*: [http://www.ecured.cu/index.php/Permanganato\\_de\\_potasio](http://www.ecured.cu/index.php/Permanganato_de_potasio)
- Espigares García, M., & Pérez López, J. (n.d.). *Precipitación química - Ablandamiento del agua*.
- HDR Engineering, I. (2001). *Handbook of Public Water Systems* (Segunda edición ed.). Canada: Wiley, John; , Sons.
- Loaiza Duque, A. (2009). *Remoción de hierro y manganeso en aguas subterráneas mediante doble filtración con flujo a presión. Caso el Hormiguero - Cali*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Perez Carrion, J. (1992). *Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano*.
- Reino Moyón, S. J. (2013). *Estudio de las aguas subterráneas de la ciudad de riobamba y sus zonas de influencia: Línea base*. Riobamba - Ecuador: Escuela superior politécnica de Chimborazo.
- Rodriguez, M., Lugo, U., & Malaver, C. (2011). Evaluación de proceso de coagulación para el diseño de una planta potabilizadora. *Umbral Científico*, 8-16.

- Romero Rojas, J. A. (2009). *Calidad del agua*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Solís Silvan, R., Laines Canepa, J. R., & Hernández Barajas, J. R. (2012). Mezclas con potencial coagulante para clasificar aguas superficiales. *División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco*.
- Trujillo, D., Duque , L. F., Arcilla , J. S., Rincón, A., Pachero, S., & Herrera, O. F. (2014). Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. *Programa de Ingeniería Ambiental. Universidad Católica de Manizales*.