



Alternativa para la remoción de Manganeseo (Mn) presente en el agua de la planta de producción de agua potable del corregimiento el Reposo mediante la evaluación de sus parámetros fisicoquímicos, en la empresa AGUAS REGIONALES EPM S.A. E.S.P.

Sara Estefanía Hernández Arboleda

Ingeniera Bioquímica

Asesor interno

Jairo Hernán Álvarez Peralta

Ingeniero químico

Asesor externo

Neider Montoya Urango

Ingeniero agroforestal

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Pregrado

Seccional Urabá

2023

Cita	(Hernández, 2023)
Referencia	Hernández Arboleda, S., (2022)., <i>Alternativa para la remoción de Manganeso (Mn) presente en el agua de la planta de producción de agua potable del corregimiento el Reposo mediante la evaluación de sus parámetros fisicoquímicos, en la empresa AGUAS REGIONALES EPM S.A. E.S.P.</i> [Ingeniería Bioquímica]. Universidad de Antioquia, Carepa-Antioquia, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Lina María Gonzáles Rodríguez.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la sabiduría y las fuerzas para culminar exitosamente mis estudios académicos. A mi madre Maritza Arboleda por su esfuerzo, paciencia y comprensión, a mis tías por su apoyo incondicional para verme graduada como ingeniera, a mi padre Noel Hernández y mis hermanos Jhoanny y Tatiana, por su apoyo y amor, a mi tía Leo quién no logró verme cumplir este sueño, pero quien día a día creyó en mí y me daba palabras de aliento para que no desistiera.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad de Antioquia, mi alma mater que me brindó todo el conocimiento para ser una persona capaz de lograr lo que hoy he logrado, donde pude conocer nuevas amistades y vivir experiencias maravillosas, a mis amigos por estar conmigo en mi proceso académico, gracias al docente Jairo Álvarez por brindarme el acompañamiento como asesor interno, a la empresa Aguas Regionales EPM y a mi asesor externo Neider Montoya por darme la oportunidad de desarrollar mis prácticas y aportar ideas en tan importante empresa.

Tabla de contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
1 Objetivos	13
1.1 Objetivo general	13
1.2 Objetivos específicos	13
2 Marco teórico	14
2.1 Aguas regionales EPM S.A. E.S.P.	14
2.2 Manganeso (Mn)	14
2.3 Manganeso en el agua	14
2.4 Silicato de sodio	15
2.5 Soda cáustica	15
2.6 Columna de precloración	15
2.7 Bandejas de aireación	16
2.8 Procesos Secuestrantes	16
2.9 Coagulación y Floculación	16
2.10 Sedimentación	17
2.11 Test de jarras	17
2.12 Filtración	18
2.13 Resolución 2115 2007	19
3 Metodología	20
3.1 Métodos convencionales	20
3.1.1 Procesos de oxidación, precipitación y filtración	20
3.2 Determinación de dosis de reactivos	21

3.2.1 Materiales, equipos y reactivos	21
3.2.2 Procedimiento	21
3.2.2.1 Aplicar silicato de sodio en el agua oxidada (antes de llegar a la etapa de floculación)	23
3.2.2.2 Aplicar soda cáustica en el agua oxidada (antes de llegar a la etapa de floculación)	25
3.2.2.3 Aplicar silicato de sodio y coagulante al agua oxidada en el momento de la floculación	27
3.2.2.4 Aplicar soda cáustica y coagulante al agua oxidada en el momento de la floculación	29
4 Resultados y Análisis	33
4.1 Ensayos	33
4.1.1 Silicato de sodio en el agua oxidada (antes de llegar a la etapa de floculación)	33
4.1.2 Soda cáustica en el agua oxidada (antes de llegar a la etapa de floculación)	34
4.1.3 Silicato de sodio y coagulante al agua oxidada en el momento de la floculación	36
4.1.4 Soda cáustica y coagulante al agua oxidada en la floculación	37
5 Conclusiones	39
Referencias	40

Lista de tablas

Tabla 1 Límites máximos permisibles según las diferentes legislaciones a nivel global.	19
Tabla 2 Análisis de parámetros iniciales ensayo 1	33
Tabla 3 Análisis de parámetros ensayo 1	33
Tabla 4 Análisis de parámetros iniciales ensayo 2	34
Tabla 5 Análisis de parámetros ensayo 2	34
Tabla 6 Análisis de parámetros iniciales ensayo 3	36
Tabla 7 Análisis de parámetros ensayo 3	36
Tabla 8 Análisis de parámetros iniciales ensayo 4	37
Tabla 9 Análisis de parámetros ensayo 4	37

Lista de figuras

Figura 1 Flujograma de unidades en operación para el tratamiento de agua del corregimiento El Reposo.	22
Figura 2 Análisis de prueba teste de jarra ensayo 1	24
Figura 3 Análisis de prueba de Manganeso ensayo 1	24
Figura 4 Filtros ensayo 1	25
Figura 5 Análisis de prueba teste de jarra ensayo 2	26
Figura 6 Análisis de prueba de Manganeso ensayo 2	26
Figura 7 Filtros ensayo 2	27
Figura 8 Análisis de prueba teste de jarra ensayo 3	28
Figura 9 Análisis de prueba de Manganeso ensayo 3	29
Figura 10 Filtros ensayo 3	29
Figura 11 Análisis de prueba teste de jarra ensayo 4	31
Figura 12 Análisis de prueba de Manganeso ensayo 4	31
Figura 13 Filtros ensayo 4	32
Figura 14 Remoción de manganeso ensayo 1 vs ensayo 2	35
Figura 15 Remoción de manganeso ensayo 3 vs ensayo 4	38

Siglas, acrónimos y abreviaturas

Mn	Manganeso
Fe	Hierro
NaOH	Soda cáustica
Na₂SiO₃	Silicato de sodio
Ppm	Unidad de medida de concentración
μl	Unidad de volumen
UNT	Unidad nefelométrica de turbidez
UPC	Unidad de color
EPM	Empresas públicas de Medellín
PPAP	Planta de producción de agua potable
UdeA	Universidad de Antioquia

Resumen

En el mundo, diversas comunidades se abastecen de aguas subterráneas para diferentes usos en sus hogares y la mayor parte de este recurso es utilizado para el consumo humano; si bien estas aguas presentan altas concentraciones de Hierro y Manganeso que son inadecuadas para el ser humano, además, al oxidarse por acción del aire y/o un oxidante, se precipitan y generan problemas de calidad, hidráulicos, económicos y sociales en los sistemas de abastecimiento de las plantas de producción de agua potable. Según Carbotecnia (Carbotecnia, 2023), el Manganeso es el metal más abundante en aguas subterráneas, encontrándose, en aguas de pozo, un valor promedio de 0,06 mg/l. El corregimiento el Reposo no escapa a estas dificultades, de acuerdo con los resultados de los estudios realizados en el laboratorio de la planta de producción de agua potable, el sistema de captación (pozo) suministra agua con valores promedios de concentración de manganeso de 0,8 mg/L, aproximadamente, y el valor máximo permisible es de 0,1 mg/L.

Esta investigación permitió evaluar, por medio de pruebas piloto a escala de laboratorio, el silicato de sodio como alternativa para reemplazar la soda cáustica (NaOH), el cual funciona bajo precipitación química, y representa un riesgo para los operadores de la planta en su manipulación debido a que es corrosivo y puede causar efectos negativos sobre la salud, esto se realizó mediante el método de secuestro analizando los parámetros fisicoquímicos del agua, y se determinó las dosis necesarias para remover manganeso y la determinación de hierro fue opcional.

Se realizaron 4 ensayos inicialmente de los cuales se les hizo 3 réplicas para un total de 16 ensayos, pero solo se presentan 4 ensayos con mejores resultados según los parámetros fisicoquímicos, correspondientes a las 4 opciones como se ve en el inciso 3.

Conforme con las pruebas de jarras, el ensayo que mejor resultados arrojó fue el ensayo con soda cáustica e hidroxiclورو de aluminio como muestra la tabla 9, en esta tabla, se pudo observar que con las dosis aplicadas a la jarra 5 hubo una remoción considerable de Manganeso, aunque el valor no está dentro de los límites máximos permisible, mientras que el valor de hierro total de la misma jarra que fue un análisis opcional si están dentro del límite máximo permisible según el Ministerio de Protección Social, 2007, véase la tabla 1.

Palabras clave: Manganeso, Hierro, remoción, silicato, soda cáustica, subterránea, pozo, prueba de jarras.

Abstract

Around the world, various communities are supplied with groundwater for different uses. in their homes and most of this resource is used for human consumption; Although these waters have high concentrations of Iron and Manganese that are unsuitable for humans, in addition, when oxidized by the action of air and/or an oxidant, they precipitate and generate quality, hydraulic, economic, and social problems in the water systems. supplying drinking water production plants.

According to (Carbotecnia, 2023), Manganese is the most abundant metal in groundwater, with an average value of 0.06 mg/l found in well water. The village of El Repose is not escapes these difficulties, according to the results of the studies carried out in the laboratory of the drinking water production plant, the collection system (well) supplies water with average manganese concentration values of 0.8 mg/L, approximately, and the maximum permissible value is 0.1 mg/L.

This research allowed sodium silicate to be evaluated through pilot tests on a laboratory scale as an alternative to replace caustic soda (NaOH), which works under chemical precipitation, and represents a risk for plant operators in its handling because it is corrosive and can cause negative effects on health, this was carried out using the sequestration method by analyzing the physicochemical parameters of the water, and the doses were determined necessary to remove manganese and the determination of iron was optional.

Initially, 4 tests were carried out, of which 3 replicates were made for a total of 16 trials, but only the initial trial values are presented.

According to the jar tests, the test that gave the best results was the test with caustic soda and aluminum hydroxychloride as shown in table 9, it could be observed that with the doses applied to jar 5 there was a considerable removal of Manganese although the value is not within the maximum permissible limits, while the total iron value of the same jar which was an optional analysis if they are within the maximum permissible limit according to the Ministry of protection Social, 2007, see table 1.

Keywords:

Manganese, Iron, removal, silicate, caustic soda, underground, well, jar test.

Introducción

Las aguas subterráneas proveen hasta el 60% del agua en algunos países de América Latina y el Caribe (María Augusta Olmedo, s.f.) y uno de sus principales usos es el consumo humano y doméstico en sectores urbanos; sin embargo, debido al mal uso de esta fuente y el inapropiado tratamiento se pueden identificar dificultades y problemas de salud para los seres humanos debido a la presencia de algunos metales como el Manganese (Mn). Este elemento químico 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. Las concentraciones elevadas de hierro y manganese 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 (DUQUE, 2009).

Actualmente, la empresa Aguas Regionales EPM cuenta con la instalación de pozos profundos en cuatro de sus Plantas de Producción de Agua Potable (Apartadó, Turbo, Chigorodó y el corregimiento El Reposo), esto debido a que, en temporada seca, los ríos Turbo y Apartadó pueden llegar a perder hasta el 90% de su caudal y se hace necesario captar agua de fuentes alternas. Brindar el acceso al agua potable a una comunidad es de gran importancia ya que satisface sus necesidades básicas de consumo. Por esta razón el corregimiento de EL Reposo cuenta con una planta de producción de agua potable para abastecer, aproximadamente, a 8115 habitantes de la zona. La planta de producción de agua potable del corregimiento El Reposo cumple un papel fundamental en cuanto a la implementación de diversos procesos, tanto fisicoquímicos como microbiológicos, a su vez llevar a cabo el tratamiento y seguimiento adecuado de las aguas crudas que llegan del sistema de captación del corregimiento, esto para asegurar que estas aguas tengan la calidad suficiente para que sean aptas al consumo humano.

La empresa Aguas Regionales EPM, realiza el tratamiento de estas aguas por medio de precipitación química con soda cáustica (NaOH), la cual ajusta el pH del Manganese (Mn) hasta el punto de su mínima solubilidad para que finalmente se formen partículas que posteriormente serán retenidas en los filtros, ya que, para este caso, remover dichas partículas, por medio de la decantación, no es suficiente debido a que son muy livianas y pueden quedar suspendidas. Sin embargo, la manipulación de este reactivo es de riesgo para los operadores de planta debido a que es corrosivo y puede causar efectos sobre la salud por diferentes vías de exposición. Es sumamente corrosivo y puede causar quemaduras graves en todo tejido con el cual entra en contacto. Inhalar niveles más altos puede producir hinchazón o espasmos de las vías respiratorias superiores lo que puede producir obstrucción y pulso imperceptible; también puede ocurrir inflamación de los pulmones y acumulación de líquido en los pulmones. (ATSDR, 2000).

Este proyecto se basa en la búsqueda de una alternativa para la remoción de Hierro (Fe) y Manganese (Mn) presente en el agua en las Plantas de Producción de Agua Potable (PPAP) del corregimiento El Reposo, perteneciente al municipio de Apartadó, que presente un menor riesgo en su implementación y que cumpla con la remoción porcentual o total del meta, para ello se realizó una búsqueda extensiva de información acerca de los tratamientos que se llevan a cabo en la planta y de los conceptos básicos necesarios para realizar un buen desarrollo del trabajo, así mismo, se realizó ensayos y revisiones a pequeña escala en el laboratorio para estudiar la alternativa. Finalmente se realizó un análisis que permita conocer cuál de las dosis utilizadas en el ensayo es la más viable y si es posible su implementación en la planta.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar una alternativa para la remoción del Manganeso (Mn) presente en las aguas de la planta de producción de agua potable (PPAP) del corregimiento El Reposo.

1.2 Objetivos específicos

- Analizar el estado del arte sobre la remoción de manganeso en el agua subterránea, teniendo en cuenta parámetros como agente químico, dosis, concentraciones, turbiedad, color y pH, entre otros.
- Determinar las concentraciones de manganeso, en época de verano y época de lluvia, del agua cruda y el agua tratada de la planta de producción de agua potable del corregimiento de El Reposo.
- Simular, a nivel de laboratorio, los procesos de presedimentación, floculación y sedimentación en una planta de potabilización de agua haciendo uso del equipo test de jarras.
- Realizar ensayos a escala piloto en el laboratorio identificando las mejores condiciones operativas.
- Estudiar la eficiencia del silicato de sodio y la soda cáustica analizando la capacidad de remoción de manganeso con ambos reactivos químicos.

2 Marco teórico

2.1 Aguas regionales EPM S.A. E.S.P.

Empresa prestadora de servicios públicos de acueducto y alcantarillado la cual opera en cinco municipios y dos corregimientos en la subregión de Urabá (Turbo, Apartadó, Carepa, Chigorodó, Mutatá y los corregimientos de Belén de Bajirá y El Reposo) y cinco municipios de la subregión occidente (Santa Fe, San Jerónimo, Sopetrán, Olaya y Sucre).

2.2 Manganeso (Mn)

El manganeso es un metal de transición con número atómico 25, perteneciente al grupo siete de la tabla periódica. Cuenta con varios estados de oxidación (+2, +3, +4, +5, +6 y +7) siendo el más importante en el ambiente natural el Mn^{2+} . (Mendoza, 2020). El manganeso es un elemento natural que se encuentra en muchos tipos de rocas, no tiene olor ni sabor especial. El manganeso puro es un metal de color plateado; sin embargo, no ocurre en el ambiente en forma de metal puro. En cambio, ocurre combinado con otras sustancias como oxígeno, azufre y cloro, estas formas (llamadas compuestas) son sólidos que no se evaporan; sin embargo, pequeñas partículas de polvo del material sólido pueden existir suspendidas en el aire. Además, algunos compuestos de manganeso pueden disolverse en el agua y bajos niveles de estos compuestos ocurren normalmente en lagos, arroyos y en el océano. El manganeso puede cambiar de un compuesto a otro (ya sea por procesos naturales o por la actividad humana), pero no se degrada ni desaparece del ambiente. Las rocas con altas concentraciones de compuestos de manganeso se minan y usan para producir manganeso metálico. El manganeso metálico se mezcla con hierro para manufacturar varios tipos de aceros. Algunos compuestos de manganeso se usan en la producción de baterías, suplementos dietéticos, y como ingredientes en ciertas cerámicas, plaguicidas y abonos. (ATSDR, 2000).

2.3 Manganeso en el agua.

El hierro y el manganeso pueden darle al agua un sabor, olor y color indeseable. El hierro causa manchas rojizos-café en la ropa, porcelana, platos, utensilios, vasos, lavaplatos, accesorios de plomería y concreto. El manganeso causa manchas café y negras en los mismos materiales. Los detergentes no remueven estas manchas. El cloro casero y los productos alcalinos (tales como el

sodio y el bicarbonato) pueden intensificar las manchas. Los depósitos de hierro y manganeso se acumulan en los tubos de cañerías, tanques de presión, calentadores de agua y equipo ablandador de agua. Estos depósitos restringen el flujo del agua y reducen la presión del agua, más energía se requiere para bombear agua a través de tubos tapados y para calentar agua si los rodos de los calentadores están cubiertos con depósitos minerales, esto aumenta los costos de la energía y el agua. (McFarland, 2023).

2.4 Silicato de sodio

El silicato de sodio es ampliamente utilizado en la fabricación de detergentes y jabones, tratamiento de aguas, fabricación de cerámicas y arcillas, consolidación de suelos y en la fabricación de papel y cartón, entre otros usos como inhibidor de corrosión en sistemas de distribución de agua debido a que forma una película protectora sobre el metal. También puede ser utilizado para prevenir la coloración del agua debido a la oxidación de hierro y manganeso. (SAS, 2021).

2.5 Soda cáustica

Es un producto que es muy soluble al agua y origina mucho calor durante la disolución. La solución tiene el tacto jabonoso característico de un álcali y es muy corrosivo. La soda cáustica es un álcali muy fuerte, se emplea en destapes de lavaplatos, lavamanos, tazas de baño, tinas, bidet, como desengrasante industrial doméstico. (universal, 2023).

2.6 Columna de precloración

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 CO₂ y H₂S propiciando la oxidación de los minerales. La transferencia de oxígeno disuelto debe ser superior a 6 mg/L y el incremento en el pH es superior al 12%. (DUQUE, 2009).

2.7 Bandejas de aireación

Presentan el mismo principio de transferencia de oxígeno que las columnas de percolación mediante el sistema tipo cascada o de caída. El número de bandejas se encuentra entre 3 a 6 unidades. Las bandejas de aireación presentan una eficiencia de remoción entre 30 y 60% para CO₂ y H₂S cuando el pH se encuentra cercano a 7,0 (DUQUE, 2009).

2.8 Procesos Secuestrantes

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 Mn. Muchos polifosfatos modernos tienen una larga cadena lineal de fosfatos, entre estos se puede incluir el silicato de sodio, fosfato de trisodio, hexametáfosfato y zinc ortofosfato; 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 2 mg/L. Ambos elementos deben estar presentes en forma bicarbonática (DUQUE, 2009).

2.9 Coagulación y Flocculación

Procesos comúnmente utilizados en plantas de tratamiento por su bajo costo y su facilidad de operación. (PULIDO, 2020).

Se fundamenta en la adición de agentes químicos (coagulantes) que desestabilizan eléctricamente algunas partículas, cancelando las cargas electrostáticas, al mismo tiempo que genera una compresión de la capa difusa que rodea los coloides. (PULIDO, 2020).

2.10 Sedimentación

La sedimentación es el proceso por el cual los sólidos que se encuentran en suspensión en el agua caen al fondo del recipiente donde el agua esté contenida. La sedimentación es un proceso natural que ocurre por el efecto de la gravedad. Aunque sucede en ríos y lagos, las personas hemos utilizado este fenómeno para conseguir un agua más pura y segura.

La sedimentación se basa en la Ley de Stokes, según la cual las partículas más grandes o pesadas que el agua tendrán una mayor capacidad de sedimentación. También influye la viscosidad del líquido, a menor viscosidad mayor capacidad y velocidad de sedimentación. (Ecología verde, 2018).

2.11 Test de jarras

La prueba de jarra es la técnica más extensamente usada para determinar la dosis de químicos y otros parámetros. En ella se tratan de simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación a nivel de laboratorio. Existe en el mercado una gran variedad de equipos para pruebas de jarras, pero en toda su versatilidad debe radicar en utilizar una serie de jarras al mismo tiempo y la posibilidad de variación de la velocidad de agitación (rpm). En este proceso influyen factores químicos e hidráulicos. Entre éstos se tiene: 1. pH. 2. Temperatura. 3. Concentración de coagulante. 4. Secuencia de aplicación de las sustancias químicas. 5. Grado de agitación. 6. Tiempo de sedimentación. (Acosta, 2006).

Debido a que la prueba de jarras es sólo una simulación del proceso, es necesario mantener las condiciones operacionales que existen en el proceso industrial como son: tiempo en la mezcla lenta y rápida, punto de aplicación de los reactivos, el orden y el tiempo de dosificación de estos.

Basado en los análisis de estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación estudiados por Acosta (Acosta, 2006), es posible tener en cuenta los siguientes criterios para realizar una prueba de jarras.

- **Mezcla rápida:** El objetivo de la mezcla rápida es crear la turbulencia o movimiento necesario en el líquido contenido en la jarra para poner en contacto los reactivos químicos

con las partículas coloidales del agua, modo de neutralizar sus cargas, desestabilizarlas y hacer que se aglomeren en un corto período de tiempo. El tiempo de aplicación de la mezcla rápida depende de la clase del coagulante.

- **Criterios para la evaluación:** para evaluar los resultados de una prueba de jarras no se siguen criterios convencionales o patrones universales y casi se trata de un criterio particular del analista, fabricante del equipo, operario de la planta de acuerdo con su larga experiencia, etc., pero bajo la convicción que le da la certeza de trabajar en las mismas condiciones experimentales y bajo los mismos criterios analíticos. No obstante, en la práctica se observan ciertos lineamientos a seguir para evaluar una prueba de jarra, como son:
 - **Características de los flóculos o partículas:** se debe tener en cuenta el tamaño, uniformidad, velocidad de aparición, voluminosos, de poco peso, si son densos, livianos y difusos, apenas puntos o microflóculos.
 - **Calidad del agua clarificada:** la claridad o transparencia, es el criterio más importante en la evaluación de una prueba de jarras, ya que es lo que se persigue en la clarificación del agua. Para ello la mayoría de las plantas disponen de turbidímetros. Se debe observar si el sobrenadante es totalmente transparente, semiturbio, turbio, con apreciable cantidad de material suspendido (TSS), decantado, semidecantado, entre otros.
 - **Velocidad de sedimentación de los flóculos:** se puede tomar el tiempo que toman los flóculos para sedimentar, una vez que se detiene la agitación en el equipo. Se deben observar parámetros como: sedimentación rápida, sedimentación lenta, casi nula, difusa y de baja sedimentación.

2.12 Filtración

La filtración es una operación unitaria cuya finalidad es la separación de un sólido insoluble que está presente en una suspensión solido-liquido, haciendo pasar dicha suspensión a través de una membrana porosa que retiene las partículas sólidas. A la membrana porosa se le denomina medio filtrante, mientras que las partículas retenidas en la membrana forman una capa que se llama torta

y el líquido que atraviesa la membrana porosa y está exento de sólidos se denomina filtrado. En la filtración puede ocurrir que la fase deseada sea el filtrado, la torta o ambos. Cuando lo que se desea obtener es la parte sólida, una vez obtenida la torta, esta debe lavarse para eliminar las impurezas que pueda contener. Para obtener el flujo de filtrado a través del medio filtrante se puede operar por simple gravedad, o bien aplicando una presión superior a la atmosférica en la parte anterior del medio filtrante o vacío en su parte posterior, denominándose filtración a presión y filtración a vacío, respectivamente. (Castañeda, 2016).

2.13 Resolución 2115 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. (SOCIAL, 2007).

Tabla 1

Límites máximos permisibles según las diferentes legislaciones a nivel global.

Tomado de Rivas (Rivas, 2021)

Continente	País	Fe (mg/L)	Mn(mg/L)	Fuente
América	Ecuador	0,3	0,1	(INEN, 2006)
	Canadá	0,3	0,12	(Health Canada, 2020)
	Estados Unidos	0,3	0,05	(Swistock, 2019)
	México	0,3	0,15	(NOM, 1994)
	Colombia	0,3	0,1	(Ministerio de Protección Social, 2007)
Europa	España	0,2	0,05	(SINAC, 2004)
	Francia	0,2	0,05	(COUNCIL, 2020)
	Alemania	0,2	0,05	(COUNCIL, 2020)
	Italia	0,2	0,05	(COUNCIL, 2020)
	Reino Unido	0,2	0,05	(COUNCIL, 2020)
Asía	Japón	0,3	0,04	(Hiroshi, 2016)
	India	0,3	0,1	(Mizoram, 2012)

3 Metodología

Como una primera etapa se llevó a cabo una revisión del estado del arte sobre la remoción de hierro y manganeso con el fin de conocer las propiedades físicas y químicas del metal, así mismo, sobre la alternativa que se evaluó y se analizó el método que se llevó a cabo haciendo uso de referencias bibliográficas, artículos, páginas web y libros con el fin de rescatar información importante de estudios para el buen desarrollo del trabajo.

3.1 Métodos convencionales

3.1.1 Procesos de oxidación, precipitación y filtración

Este tipo de proceso normalmente consiste en sistemas de dosificación del compuesto químico seleccionado de acuerdo con las condiciones del proceso, que permitan la reacción de oxidación, la cual promueve la conversión de materia soluble a un estado insoluble y precipitable; para después ingresar a un filtro, donde dependiendo de las condiciones y configuración del proceso se pueden alcanzar eficiencias de remoción de hasta el 99% para hierro y 98% para manganeso en aguas subterráneas. Los oxidantes empleados generalmente incluyen hipoclorito, permanganato de potasio, peróxido de hidrogeno, cloro, ozono, dióxido de cloro entre otros, de los que es necesario determinar la dosis óptima de acuerdo con las características del proceso (Rivas, 2021).

Conforme a lo mencionado por Duque, (DUQUE, 2009) al utilizar sustancias químicas como oxidante de hierro y manganeso, es importante garantizar un tiempo de contacto entre 5 y 30 minutos que permita una eficiente y completa reacción química, para tal fin, es necesario incorporar tanques de contacto que garanticen el tiempo requerido en donde se podrá llevar a cabo secuencialmente ajuste del pH, aplicación del oxidante y retiro de material precipitado. (Rivas, 2021).

Luego, en la segunda etapa se llevó a cabo pruebas ensayo-error en el laboratorio con el equipo test de jarras que permitió simular el proceso de la planta de producción de agua del corregimiento

El Reposo, reemplazando la dosis del NaOH por el silicato de sodio en varias etapas del proceso, con el fin de obtener el mejor resultado de remoción en el laboratorio para luego llevarlos a cabo en la planta de producción de agua potable del corregimiento en mención, cabe mencionar que se hicieron cuatro (4) ensayos en diferentes etapas a los que se les hizo tres réplicas por ensayo para un total de 16 ensayos, estos se realizaron teniendo en cuenta la metodología que se describe en los próximos ítems.

3.2 Determinación de dosis de reactivos

3.2.1 Materiales, equipos y reactivos

- Equipo de jarras
- Espectrofotómetro
- Turbidímetro
- pH metro
- Beakers de 1000 ml
- Micropipeta de 100 µl
- Silicato de sodio
- Soda cáustica
- Hidroxicloruro de aluminio (coagulante)

3.2.2 Procedimiento

Inicialmente se llevó la muestra de silicato de sodio de la planta de producción de agua del municipio de Apartadó hacia la planta del corregimiento El Reposo, posterior a eso, se hizo un recorrido en planta para visualizar las etapas en las cuales se ha realizado antes este estudio con la soda cáustica y se analizó el porque de resultados no esperados para descartar esa etapa, debido a que el silicato de sodio se aplicaba directamente en los sedimentadores y los filtros se colmataban, se pudo determinar que el silicato de sodio no tuvo un tiempo de reacción necesario para remover Mn y Fe y éstos se vieron reflejados en altas concentraciones en las muestras de agua tratada en el laboratorio.

Este proceso ayuda a visualizar nuevas alternativas para adicionar el silicato de sodio en una etapa del proceso de tratamiento diferente a la que anteriormente se ensayó, preferiblemente antes del proceso de sedimentación, con el fin de obtener mejores resultados, y se proyectaron tres ensayos de los cuales se hicieron diferentes réplicas, como se muestra en los resultados, de la siguiente manera:

El agua para realizar los ensayos se caracterizó inicialmente midiendo parámetros de Mn y Fe con un kit para medir manganeso y ferover que es el reactivo para medición de hierro, medición turbiedad en un turbidímetro HACH, el color en espectrofotómetro (HACH) a una longitud de onda (460 nm) y pH en un pH metro de marca (HACH), todos estos equipos del laboratorio de la planta de producción de agua potable (PPAP) de El Reposo.

Se tomó una muestra de seis (6) litros de agua cruda de las bandejas de aireación, antes de llegar a los floculadores, se adicionaron en seis (6) beakers de 1000 ml cada uno, se agregó la dosis de reactivo y se inició el equipo test de jarra, se definió los tiempos de agitación y los gradientes de operación en revoluciones por minuto (rpm), luego se filtró el agua clarificada en el equipo bomba de vacío, se utilizaron filtros de membrana de nitrato celulosa 0,45 micras y 47 mm de diámetro. Una vez caracterizada el agua con los parámetros anteriormente mencionados, se realizó una distribución de dosis basada en los cálculos que se muestran a continuación de la figura 1.

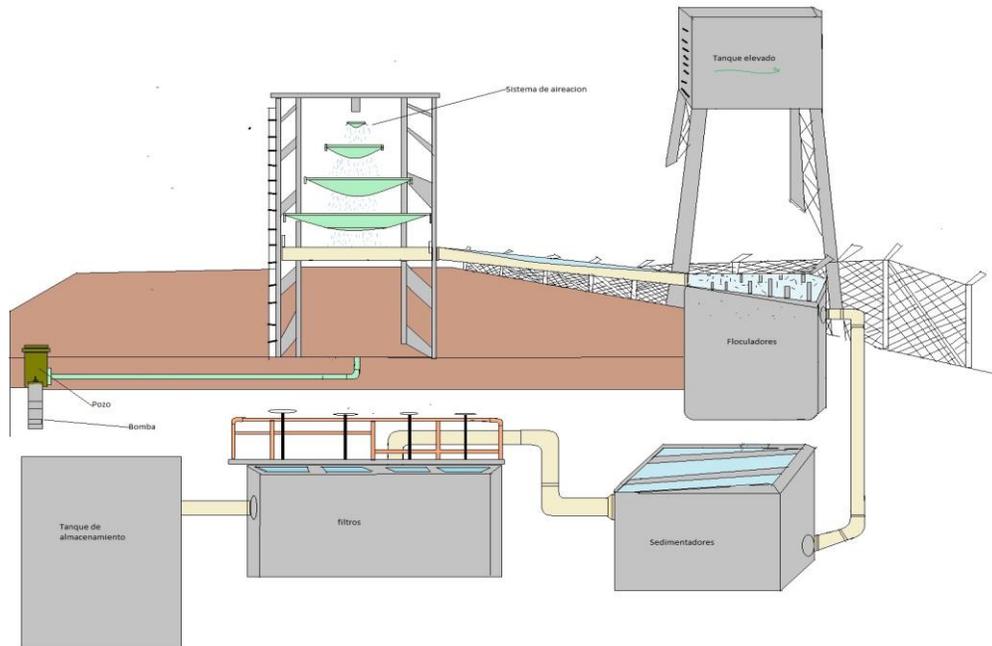


Figura 1. *Flujograma de unidades en operación para el tratamiento de agua del corregimiento El Reposo.
Tomado de: elaboración propia.*

3.2.2.1 Aplicar silicato de sodio en el agua oxidada (antes de llegar a la etapa de floculación)

Se tomó una muestra de agua oxidada, previamente con cloro y oxígeno, para realizar la simulación de la planta con el equipo de ensayo de jarras, se aplicó dosis manual del silicato de sodio con una micropipeta de 100 ul a cada jarra y se inició el equipo para empezar el proceso. Una vez terminado el proceso, el agua de cada jarra se pasó por un proceso de filtración con el equipo bomba de vacío, posterior a esto, se tomó con una manguera el clarificado que se obtuvo después del filtro, se tomaron los valores de los parámetros fisicoquímicos como turbiedad, color, pH y Mn y Fe al agua después de haberla filtrado para analizar los resultados. Es de aclarar que los parámetros en mención se registraron al iniciar el ensayo y, se compararon con los resultados después del proceso de simulación. La dosis mencionada anteriormente se calculó haciendo uso de la siguiente ecuación:

Silicato de sodio:

$$\text{silicato de sodio} = \frac{\text{ppm} * 1000 \text{ ml}}{220000 \text{ ppm}} * 1000 \mu\text{l}$$

Donde:

- ppm son las partes por millón que se aplica de silicato en el momento en la planta de proceso.
- 1000 ul es el volumen del beaker que se utilizó para el ensayo con el equipo de la prueba de jarra.
- 22 0000 ppm es la concentración a la que está preparado el reactivo (22%)
- 1000 ul es el factor de conversión para pasar de ml a ul ya que la dosis fue tomada con una micropipeta de 100 ul.

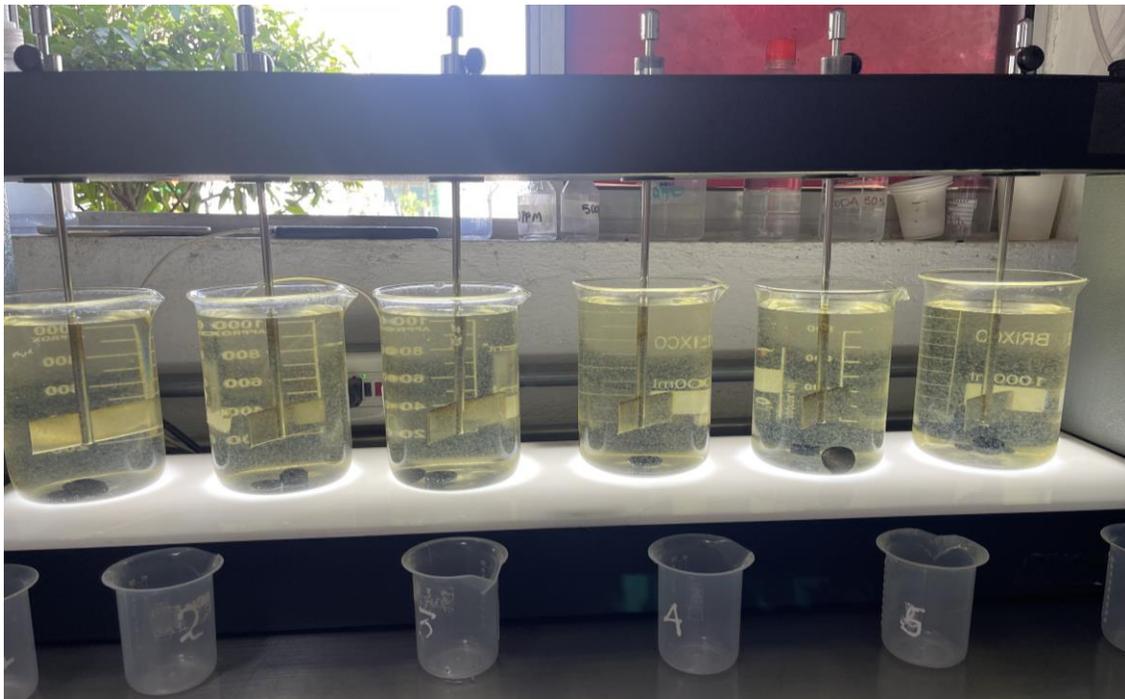


Figura 2. *Análisis de prueba test de jarra primer ensayo*



Figura 3. *Análisis de prueba de manganeso*

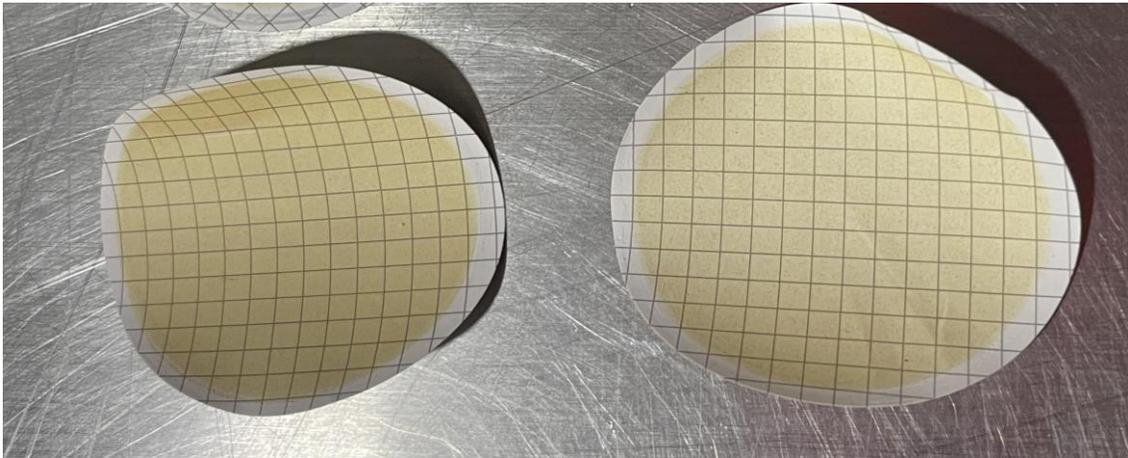


Figura 4. *Filtros*

3.2.2.2 Aplicar soda cáustica en el agua oxidada (antes de llegar a la etapa de floculación).

Se tomó una muestra de agua oxidada, previamente con cloro y oxígeno, para realizar la simulación de la planta con el equipo de ensayo de jarras, se le aplicó dosis manual de soda cáustica con una micropipeta de 100 μ l a cada jarra y se encendió el equipo para empezar el proceso, una vez terminado, el agua de cada jarra se pasó por un proceso de filtración con el equipo bomba de vacío, posterior a esto, se tomó con una manguera el clarificado que se obtuvo después del filtro, se tomaron los valores de los parámetros fisicoquímicos como turbiedad, color, pH, Mn y Fe al agua después de haberla filtrado para analizar los resultados. Es de aclarar que los parámetros en mención se registraron al iniciar el ensayo y, se compararon con los resultados después del proceso de simulación. La dosis mencionada anteriormente se calculó haciendo uso de la siguiente ecuación:

Soda cáustica:

$$\text{soda cáustica} = \frac{\text{ppm} \cdot 1000 \text{ ml}}{500000 \text{ ppm}} * 1000 \mu\text{l}$$

Donde:

- ppm son las partes por millón que se aplica de soda en el momento en la planta.
- 1000 ml es el volumen del beaker que se utiliza para el ensayo con el equipo de la prueba de jarra.

- 500000 ppm es la concentración a la que está preparado el reactivo NaOH (50%)
- 1000 ul es el factor de conversión para pasar de ml a ul ya que la dosis fue tomada con una micropipeta de 100 ul.
-



Figura 5. Análisis de prueba teste de jarra segundo ensayo

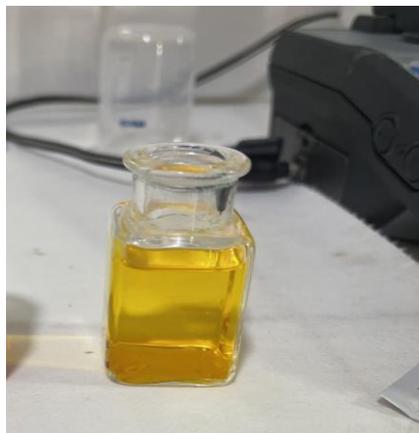


Figura 6. Análisis de prueba de manganeso

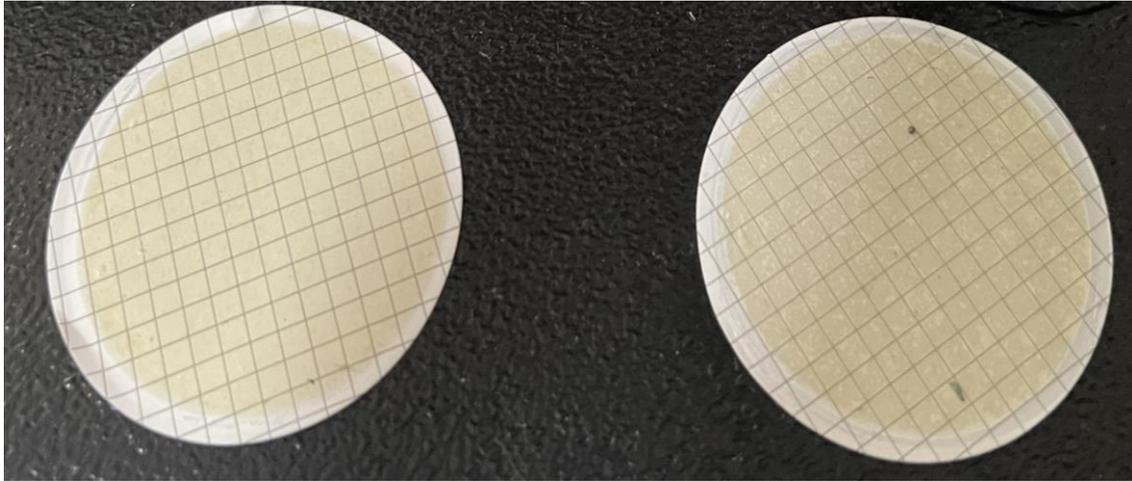


Figura 7 *Filtros*

3.2.2.3 Aplicar silicato de sodio y coagulante al agua oxidada en el momento de la floculación.

Se tomó una muestra de agua oxidada, previamente con cloro y oxígeno, para realizar la simulación de la planta con el equipo de ensayo de jarras, se le aplicó dosis manual del silicato de sodio y coagulante con una micropipeta de 100 μ l a cada jarra y se encendió el equipo para empezar el proceso, una vez terminado, el agua de cada jarra se pasó por un proceso de filtración con el equipo bomba de vacío, posterior a esto, se tomó con una manguera el clarificado que se obtuvo después del filtro, se tomaron los valores de los parámetros fisicoquímicos como turbiedad, color, pH y Mn y Fe al agua después de haberla filtrado para analizar los resultados. Es de aclarar que los parámetros en mención se registraron al iniciar el ensayo y, se compararon con los resultados después del proceso de simulación. La dosis mencionada anteriormente se calculó haciendo uso de la siguiente ecuación:

Silicato de sodio:

$$\text{silicato de sodio} = \frac{\text{ppm} \cdot 1000 \text{ ml}}{220000 \text{ ppm}} * 1000 \mu\text{l}$$

Donde:

- ppm son las partes por millón que se aplica de silicato en el momento en la planta.

- 1000 ml es el volumen del beaker que se utiliza para el ensayo con el equipo del test de jarra.
- 220 000 ppm es la concentración a la que está preparado el reactivo (22%).
- 1000 ul es el factor de conversión para pasar de ml a ul ya que la dosis se toma en una micropipeta de 100 ul.

Coagulante Hidroxicloruro de aluminio:

$$\text{Hidroxicloruro de aluminio} = \frac{\text{ppm} \cdot 1000 \text{ ml}}{1000000 \text{ ppm}} * 1000 \mu\text{l}$$

Donde:

- ppm son las partes por millón que se aplica de coagulante en el momento en la planta.
- 1000 ml es el volumen del beaker que se utiliza para el ensayo con el equipo de la prueba de jarra.
- 1000000 ppm es la concentración a la que está preparado el reactivo (100%)
- 1000 ul es el factor de conversión para pasar de ml a ul ya que la dosis se toma en una micropipeta de 100 ul.

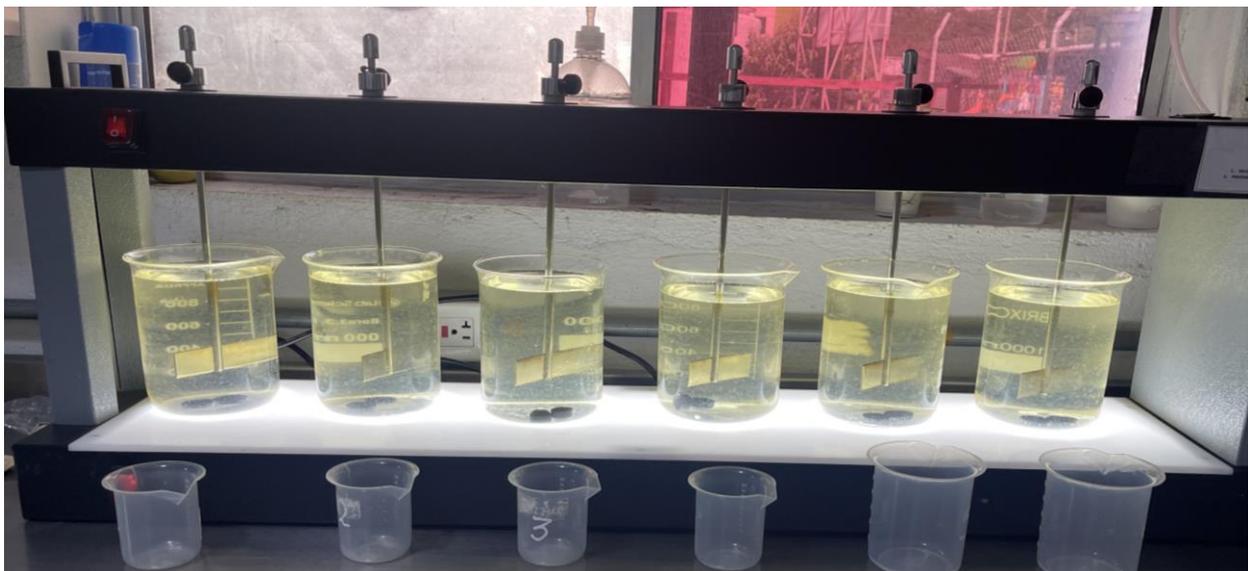


Figura 8. Análisis de prueba teste de jarra tercer ensayo



Figura 9. *Análisis de prueba de manganeso*

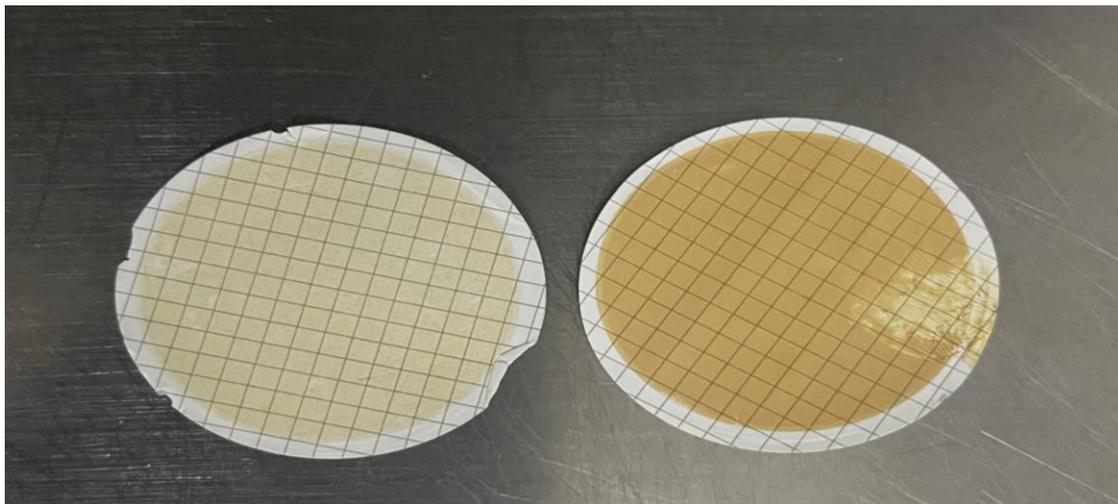


Figura 10. *Filtros.*

3.2.2.4 Aplicar soda cáustica y coagulante al agua oxidada en la floculación

Se tomó una muestra de agua oxidada, previamente con cloro y oxígeno, para realizar la simulación de la planta con el equipo de ensayo de jarras, se le aplicó dosis manual de soda cáustica y coagulante con un micropipeta de 100 ul a cada jarra y se encendió el equipo para empezar el proceso, una vez terminado, el agua de cada jarra se pasó por un proceso de filtración con el equipo bomba de vacío, posterior a esto, se tomó con una manguera el clarificado que se obtuvo después del filtro, se tomaron los valores de los parámetros fisicoquímicos como turbiedad, color, pH y Mn y Fe al agua después de haberla filtrado para analizar los resultados. Es de aclarar que los

parámetros en mención se registraron al iniciar el ensayo y se compararon con los resultados después del proceso de simulación. La dosis mencionada anteriormente se calculó haciendo uso de la siguiente ecuación:

Soda cáustica:

$$\text{soda cáustica} = \frac{\text{ppm} * 1000 \text{ ml}}{500000 \text{ ppm}} * 1000 \mu\text{l}$$

Donde:

- ppm son las partes por millón que se aplica de soda en el momento en la planta.
- 1000 ml es el volumen del beaker que se utiliza para el ensayo con el equipo de la prueba de jarra.
- 500000 ppm es la concentración a la que está preparado el reactivo (50%)
- 1000 ul es el factor de conversión para pasar de ml a ul ya que la dosis se toma en una micropipeta de 100 ul

Coagulante Hidroxicloruro de aluminio:

$$\text{Hidroxicloruro de aluminio} = \frac{\text{ppm} * 1000 \text{ ml}}{1000000 \text{ ppm}} * 1000 \mu\text{l}$$

Donde:

- ppm son las partes por millón que se aplica de coagulante en el momento en la planta.
- 1000 ml es el volumen del beaker que se utiliza para el ensayo con el equipo de la prueba de jarra.
- 1000000 ppm es la concentración a la que está preparado el reactivo (100%)
- 1000 ul es el factor de conversión para pasar de ml a ul ya que la dosis se toma en una micropipeta de 100 ul

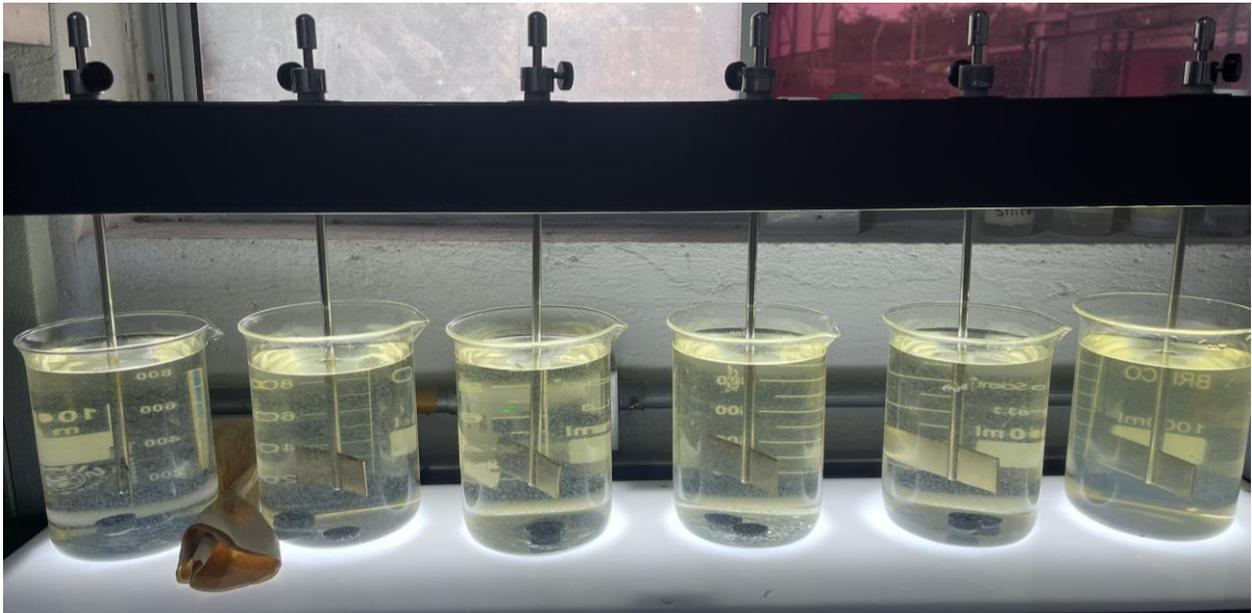


Figura 11. *Análisis de prueba teste de jarra cuarto ensayo*



Figura 12. *Análisis de prueba de manganeso*

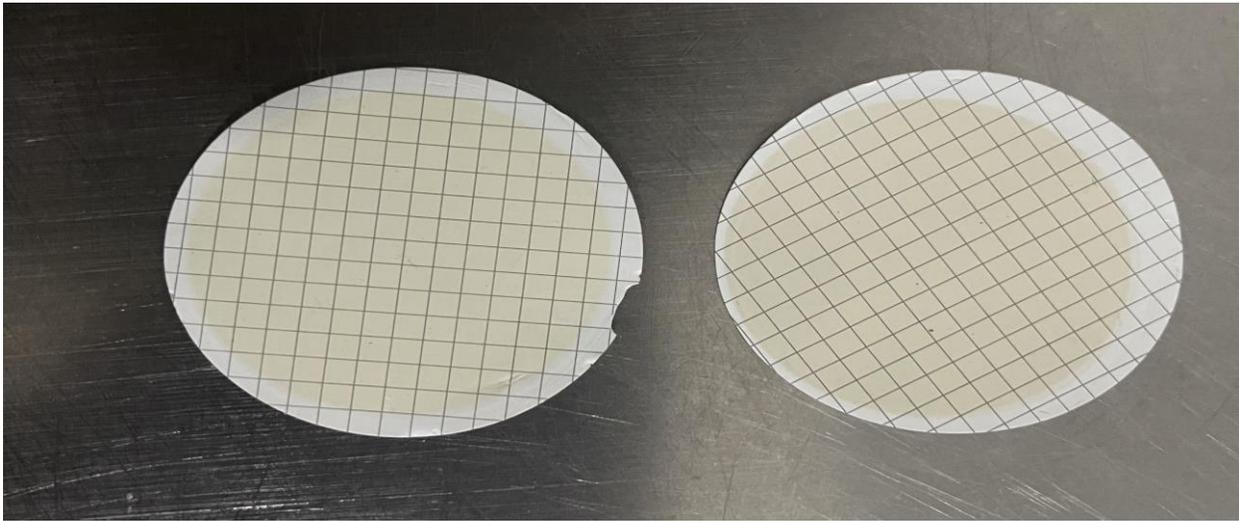


Figura 13. *Filtros*

4. Resultados y análisis

4.1 Ensayos

4.1.1 Silicato de sodio en el agua oxidada (antes de llegar a la etapa de floculación).

Tabla 2. Análisis parámetros iniciales

<i>Caracterización inicial (antes de la prueba)</i>	
<i>Turbiedad (UNT)</i>	7,07
<i>Color (UPC)</i>	124
<i>pH</i>	7,6
<i>Manganeseo mg/L</i>	0,71
<i>Hierro mg/L</i>	4,2

Tabla 3. Análisis parámetros ensayo 1

<i>Jarras</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>Dosis silicato (PPM)</i>	6	8	10	12	14	16
<i>Silicato (µl)</i>	27,7	36,3	45,4	54,5	63,6	72,7
<i>Turbiedad (UNT)</i>	0,43	0,36	0,34	0,31	0,32	0,3
<i>Color (UPC)</i>	7	1	2	1	2	1
<i>pH</i>	7,61	7,7	7,78	7,65	7,68	7,62
<i>Manganeseo mg/L</i>				0,51		
<i>Hierro mg/L</i>				0,12		

Después de observar los parámetros analizados, se midió muestra de Hierro y Manganeseo solo en la jarra que arrojó mejores resultados, (jarra 4), esto con el fin de ahorrar reactivos.

La jarra con mejores resultados (4) se pudo determinar de acuerdo con los criterios establecidos por (Acosta, 2006).

Según la resolución 2115 del 2007 del ministerio de la protección social ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial 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 y Rivas (Rivas, 2021), los límites máximos permisibles en este ensayo no fue aceptable para el manganeso, ya que está por encima de 0,1 mg/L que es el límite máximo para que el agua sea apta para el consumo humano, caso contrario del Hierro que aunque fue un parámetro opcional si arrojó un buen resultado ubicando su valor dentro del rango del límite permisible para el consumo humano que es 0,3 mg/L.

4.1.2 Soda cáustica en el agua oxidada (antes de llegar a la etapa de floculación).

Tabla 4. Análisis parámetros iniciales

<i>Caracterización inicial (antes de la prueba)</i>	
<i>Turbiedad (UNT)</i>	6,59
<i>Color (UPC)</i>	102
<i>pH</i>	7,54
<i>Manganeso mg/L</i>	0,65
<i>Hierro mg/L</i>	4,36

Tabla 5. Análisis parámetros ensayo 2

<i>Jarras</i>	1	2	3	4	5	6
<i>Dosis soda (PPM)</i>	24	26	28	30	32	34
<i>Soda(µl)</i>	48	52	56	60	64	68
<i>Turbiedad (UNT)</i>	0,33	0,25	0,16	0,12	0,9	0,5
<i>Color (UPC)</i>	1	1	0	0	0	0
<i>pH</i>	9,43	9,7	9,59	9,33	9,47	9,41
<i>Manganeso mg/L</i>					0,43	
<i>Hierro mg/L</i>					0,1	

En el ensayo dos (2) se pudo observar que la soda cáustica actúa mejor que el silicato de sodio en cuanto a la remoción de hierro y manganeso, además los resultados de los parámetros turbiedad y color dan menores a los analizados en el ensayo 1, esto se da ya que la soda funciona bajo precipitación química, y forma un sólido llamado precipitado en el cual se encapsula el hierro y el manganeso y se forman partículas de flóculo más grandes, por lo que se sedimenta más rápido, y

en el momento de filtrar, todas las partículas quedan suspendidos en el filtro, obteniendo así el agua con mejores condiciones.

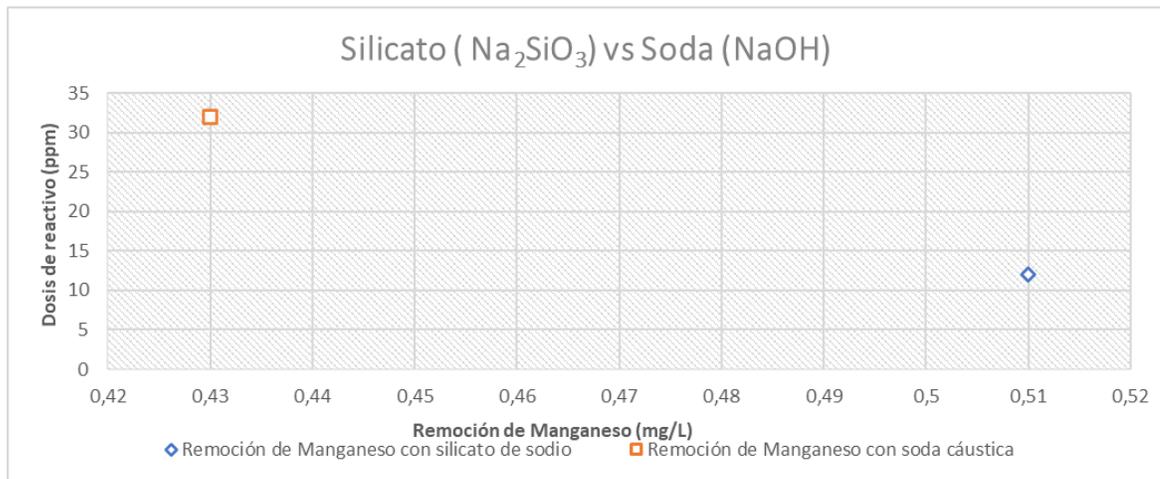


Figura 14. Remoción de manganeso ensayo 1 vs ensayo 2

4.1.3 Silicato de sodio y coagulante al agua oxidada en el momento de la floculación

Tabla. Análisis parámetros iniciales

<i>Caracterización inicial (antes de la prueba)</i>	
<i>Turbiedad (UNT)</i>	9,7
<i>Color (UPC)</i>	114
<i>pH</i>	7,58
<i>Manganese mg/L</i>	0,77
<i>Hierro mg/L</i>	3,6

Tabla 7. Análisis parámetros ensayo 3

Jarras	1	2	3	4	5	6
Dosis silicato (PPM)	6	8	10	12	14	16
Silicato (µl)	27,7	36,3	45,4	54,5	63,6	72,7
Dosis PAC (µl)	18	18	18	18	18	18
Turbiedad (UNT)	0,36	0,23	0,19	0,13	0,11	0,09
Color (UPC)	2	1	1	1	1	1
pH	7,57	7,66	7,79	7,69	7,73	7,85
Manganeso mg/L					0,49	
Hierro mg/L					0,16	

En el ensayo 3 se evidencia que la presencia del coagulante hidroxiclорuro de aluminio mejora u optimiza las condiciones del proceso notablemente ya que tiene buen efecto en remoción de colores, sólidos suspendidos y turbidez, esto sucede debido a que al generar el floc todos los sólidos se sedimentan y los filtros no se colmatan, por ende el agua después del proceso de filtrado queda en mejores condiciones.

Es de aclarar que, aunque el manganeso no está dentro del límite máximo permisible en este ensayo los resultados son mejores que el ensayo 1 donde se usó silicato de sodio sin coagulante.

4.1.4 Soda cáustica y coagulante al agua oxidada en la floculación

Tabla 8. Análisis parámetros iniciales

<i>Caracterización inicial (antes de la prueba)</i>	
Turbiedad (UNT)	7,11
Color (UPC)	130
pH	7,61
Manganeso mg/L	0,63
Hierro mg/L	3,72

Tabla 9. Análisis parámetros ensayo 4

<i>Jarras</i>	1	2	3	4	5	6
<i>Dosis soda (PPM)</i>	24	26	28	30	32	34
<i>Soda (µl)</i>	48	52	56	60	64	68
<i>Dosis PAC (µl)</i>	18	18	18	18	18	18
<i>Turbiedad (UNT)</i>	0,27	0,22	0,17	0,15	0,11	0,6
<i>Color (UPC)</i>	1	1	0	0	0	0
<i>pH</i>	9,4	9,22	9,69	9,37	9,5	9,6
<i>Manganeso mg/L</i>					0,42	
<i>Hierro mg/L</i>					0,1	

Luego de analizar los parámetros del ensayo 4 se pudo concluir que fue el ensayo con mejores resultados en cuanto a turbiedad, color, Hierro y Manganeso esto por lo anteriormente mencionado en el ensayo 2 sobre las características de la soda y se observó que actuó mucho mejor con el hidroxiclorigenato de aluminio ya que es un ayudante de coagulación y formación de floc para facilitar la sedimentación del agua, por lo que el agua cuando es filtrada el filtro no se colmata tanto y se puede visualizar en la figura 13.

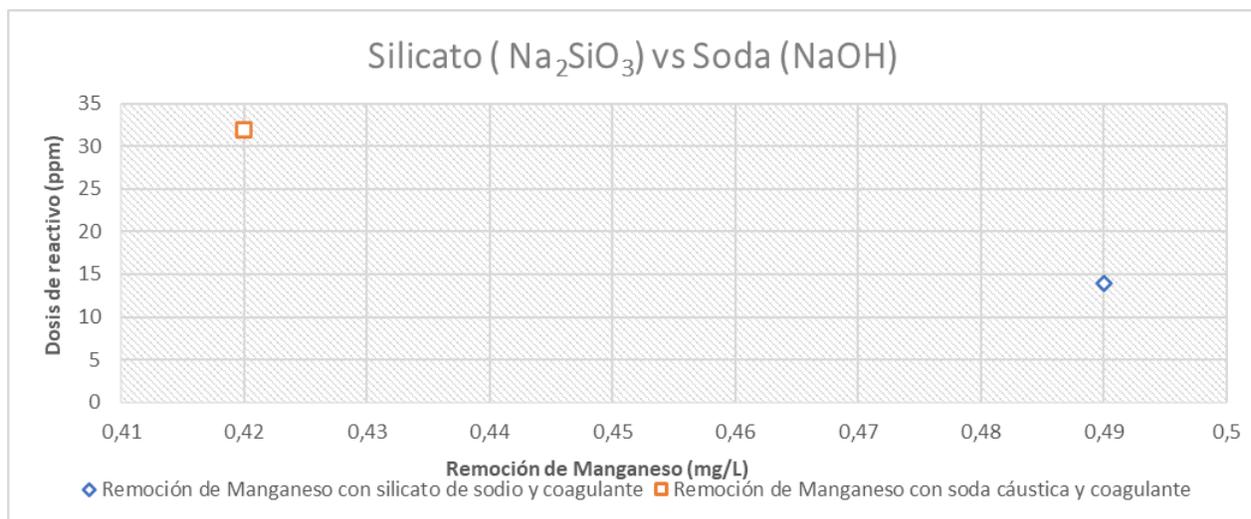


Figura 15. Remoción de manganeso ensayo 3 vs ensayo 4.

De la figura 15 se puede evidenciar que, la soda cáustica con el coagulante hidroxiclورو de aluminio presenta una remoción más significativa en comparación con el silicato de sodio acompañado del coagulante.

5 Conclusiones

- Se puede decir que el problema de la aparición de metales desde las tuberías en algunas de las viviendas del corregimiento de El Reposo podría ser por deterioro en las tuberías, las concentraciones de metales en el agua se encuentran, en la gran mayoría de las viviendas, dentro de los valores establecidos según la resolución 2125 del 2007 para el consumo humano, y no se considera necesario tomar medidas de carácter general situación que aporta confiabilidad a la empresa Aguas regionales EPM, que garantiza a la comunidad el servicio de agua apto para consumir.
- Los métodos convencionales como los de oxidación, precipitación y filtración para la remoción de Hierro y Manganeso según la revisión bibliográfica resultan ser las opciones más utilizadas ya que son de sencilla operación, funcionan para altas cantidades de afluentes y su costo suele ser bajo, pero es importante mencionar que también la revisión bibliográfica arroja otros métodos utilizados que presentan resultados aceptables de remoción y pueden resultar benéficos dependiendo las condiciones del agua donde se desea realizar el estudio, aunque podrían generar un mayor costo al método comúnmente utilizado.
- Los diferentes ensayos para la remoción de hierro y Manganeso permitieron observar eficiencias significativas de eliminación de estos metales, sin embargo, dichos valores están relacionados a características y parámetros específicos como se expone en el inciso 4, por lo que se concluye que el proceso de evaluación, selección y desarrollo de una alternativa implica el estudio de dichas características y parámetros a profundidad para lograr un mejor resultado.
- La simulación de los procesos floculación, pre-sedimentación, sedimentación y filtrado mediante los ensayos realizados con el test de jarras fue favorable, aunque los ensayos aún no permiten de manera adecuada realizar el escalamiento a planta, debido a que hubo ciertas diferencias en los ensayos, por lo que se necesita mas tiempo de desarrollo del estudio.

Referencias

- Acosta, Y. L. (2006). *Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación*.
Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120664002.pdf>
- ATSDR. (Septiembre de 2000). *Agencia para Sustancias Tóxicas*. Obtenido de
https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs151.pdf
- Carbotecnia. (2023). Obtenido de <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/quimica-del-agua/el-manganeso-en-el-agua/>
- Castañeda, N. J. (Diciembre de 2016). *DISEÑO DE UN FILTRO HORIZONTAL ROTATORIO PARA APLICACIONES*. Obtenido de
http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/2285/1/Soto_2016_TG.pdf
- DUQUE, A. L. (2009). *REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO EN AGUAS*. Obtenido de
<https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/af68702b-25d2-42fc-a218-99a0a489888a/content>
- Ecología verde*. (2018). Obtenido de <https://www.ecologiaverde.com/que-es-la-sedimentacion-del-agua-potable-1507.html#:~:text=La%20sedimentaci%C3%B3n%20es%20el%20proceso,el%20efecto%20de%20la%20gravedad.>
- María Augusta Olmedo, P. G. (s.f.). *BID*. Obtenido de <https://blogs.iadb.org/agua/es/aguas-subterranas-el-valor-de-lo-invisible/>
- McFarland, M. L. (2023). *El Sistema Universitario Texas A&M*. Obtenido de
<https://texaswater.tamu.edu/resources/factsheets/15451sironandman.pdf>
- Mendoza, O. H. (2020). *Servicio geológico colombiano*. Obtenido de
https://srvags.sgc.gov.co/Archivos_Geoportal/Amenaza_Sismica/Atlas_Geoquimico_2020/pdf/21.Mn.pdf
- PULIDO, A. N. (2020). *OPTIMIZACION DE LOS PROCESOS DE COAGUALACION - FLOCULACION*. Obtenido de
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/26395/AvilaPulidoAngie%20Natalia2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

-
- Rivas, J. R. (09 de Septiembre de 2021). *Estudio de los procesos de remoción de hierro y manganeso en aguas*. Obtenido de [file:///C:/Users/estef/Downloads/Dialnet-EstudioDeLosProcesosDeRemocionDeHierroYManganesoEn-8094613%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/estef/Downloads/Dialnet-EstudioDeLosProcesosDeRemocionDeHierroYManganesoEn-8094613%20(2).pdf)
- SAS, S. (2021). *SILICATO DE SODIO*. Obtenido de <https://irp.cdn-website.com/00bdcc5d/files/uploaded/F.T%20SILICATO%20DE%20SODIO.pdf>
- SOCIAL, M. D. (22 de Junio de 2007). *RESOLUCIÓN NÚMERO 2115* . Obtenido de https://scj.gov.co/sites/default/files/marco-legal/Res_2115_de_2007.pdf
- universal, Q. (2023). *SODA CÁUSTICA*. Obtenido de <https://quimicauniversal.cl/www/wp-content/uploads/2017/03/Soda-Ca%CC%81ustica-FT.pdf>