

Informe Final: Levantamiento de proceso, tratamiento de aguas para producción y servicio.



Nombre: Matías Alfonso Mujica Lillo

Asignatura: Pasantía Full Time sección 18

Profesor: María Francisca Martinich

04 de diciembre 2023

Resumen ejecutivo: El informe presentado a continuación contempla un estudio realizado para Coca Cola Embonor S.A. Que tiene como finalidad reducir la concentración de manganeso en la entrada de uno de los seis procesos ejecutados en la planta de tratamientos de aguas: Filtrado con arena verde. A través de un desarrollo analítico se toman muestras para confirmar las características del agua y observar que efectivamente el parámetro de operación actual tiene como promedio 4,9 [ppm] de manganeso, superando por 1,9 [ppm] el límite propuesto por el proveedor del dispositivo. Por otro lado, es posible, evidenciar una precipitación de los contaminantes oxidados por la dosificación de Hipoclorito de sodio. La sobrecarga en concentración del contaminante en específico representa una pérdida en efectividad de remoción y tiempo de carrera o uso de los filtros, también significa un gasto mensual en exceso y necesidad de constante atención y monitoreo por parte del equipo operador. Se formula una propuesta de solución en base a lo investigado: Diseño y dimensionamiento de un decantador lamelar. Para corroborar la efectividad del planteamiento se realizan métodos experimentales de eliminación de sólidos suspendidos y velocidad de decantación, en filtros de papel y cono de decantación, respectivamente. Se obtienen resultados positivos en las medidas de desempeño: La concentración de manganeso disminuye en un 70% entregando la posibilidad de aumentar el tiempo de carrera de 180 – 195 [min] a 654 – 1080 [min] y generando un ahorro mensual tanto de capital como de horas hombre.

Executive Summary: The report presented below encompasses a study conducted for Coca Cola Embonor S.A., aimed at reducing the manganese concentration at the inlet of one of the six processes carried out in the water treatment plant: Green sand filtration. Through analytical development, samples are taken to confirm the water characteristics and observe that the current operational parameter averages 4.9 [ppm] of manganese, exceeding the limit proposed by the device supplier by 1.9 [ppm]. Additionally, precipitation of oxidized contaminants is evident through the dosing of sodium hypochlorite. The overload in the concentration of the specific contaminant represents a loss in removal effectiveness and filter runtime or usage time, leading to monthly excess expenses and the need for constant attention and monitoring by the operating team. A proposed solution is formulated based on the research: Design and sizing of a lamellar settler. To corroborate the effectiveness of the proposal, experimental methods for suspended solids removal and settling velocity are conducted using paper filters and settling cone, respectively. Positive results are obtained in performance measures: The manganese concentration decreases by 70%, providing the opportunity to increase the runtime from 180 – 195 [min] to 645 – 1106 [min], resulting in monthly savings in both capital and labor hours.

Índice:

1. Introducción.....	Página 3 a 9
2. Objetivos.....	Página 10
3. Estado del arte.....	Página 10 a 12
4. Propuesta solución.....	Página 12 a 15
5. Evaluación económica.....	Página 16
6. Metodologías.....	Página 17 a 21
7. Medidas de desempeño.....	Página 21
8. Plan de implementación.....	Página 22
9. Matriz de riesgos.....	Página 22
10. Resultados obtenidos.....	Página 22 a 23
11. Conclusiones y discusión.....	Página 23
12. Referencias.....	Página 24

1. Introducción:

En la actualidad, el tratamiento de aguas es un proceso crucial. A través de diferentes técnicas se garantiza la seguridad del suministro hídrico en diversas aplicaciones. A lo largo de todo nuestro planeta, esta práctica involucra una amplia gama de tecnologías contingentes, así es como hoy en día es posible realizar tanto la depuración de agua para consumo humano (agua potable), como también la remoción de contaminantes de aguas residuales industriales, en otros ámbitos el tratamiento de aguas se utiliza para la preservación y conservación de la vida en ecosistemas acuáticos. En el contexto mundial actual, este proceso ha adquirido un papel de importancia crítica, considerando la escasez de agua y la contaminación creciente (Ref. N°1).

Una de las diversas aplicaciones que permite el tratamiento de aguas realizar, es la eliminación de contaminantes (Ref. N°1). A través de la extracción, purificación y embotellamiento del agua se genera un proceso productivo para su posterior venta. Esto implica alcanzar ciertos estándares de calidad que otorguen al recurso hídrico la potabilidad necesaria en términos de metales pesados como el fierro, manganeso o aluminio, por otro lado, es necesario monitorear los sólidos suspendidos totales, la alcalinidad y su turbidez (Ref. N°2). En ese sentido se presenta a Coca Cola Embonor S.A. una empresa embotelladora y distribuidora de bebidas no alcohólicas como; Fanta, Sprite, Aquarius, benedictino y su producto más aclamado Coca Cola. Se sitúa en la quinta región de nuestro país, específicamente en el sector industrial Gulmue de Concón. Dentro del recinto se encuentran diferentes áreas de la organización; ventas, marketing, medioambiente, laboratorio, sala de jarabe, planta de tratamientos de aguas, R.I.L.E.S, separación de residuos, ecológica y dos líneas de producción masiva.

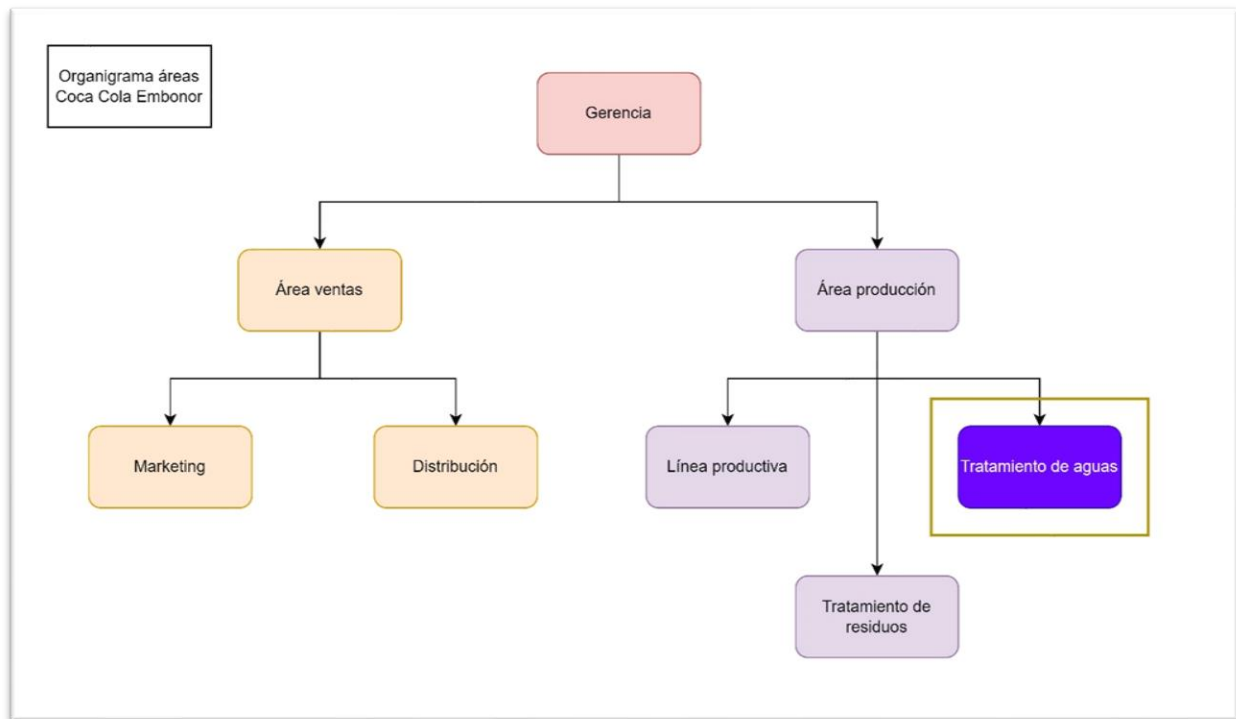


Imagen N° 1: Organigrama jerárquico gerencia Coca Cola Embono S.A. Se presenta en términos generales. (Ref. N14. Anexo N°5: Organigrama Coca Cola Embonor S.A.).

Dentro de las zonas productivas, se encuentra la planta de tratamientos de aguas, es ahí en donde a través de diferentes procesos operacionales, se obtiene el insumo hídrico depurado, bajo estrictos estándares de calidad ("Coca Cola Company"). El agua tratada se utiliza para producción, servicios de producción (Sanitización de filtros y lavado de botellas) y servicios básicos. Para ello, la empresa extrae agua cruda de napas subterráneas adyacentes, tomando como fuente de alimentación dos pozos inscritos denominados "Pozo N°2" y "Pozo N°3". El primero, con un caudal de 76 [m3/h], se mantiene en constante funcionamiento debido a su calidad de agua. El segundo, con un caudal de 90 [m3/h], es una entrada auxiliar.

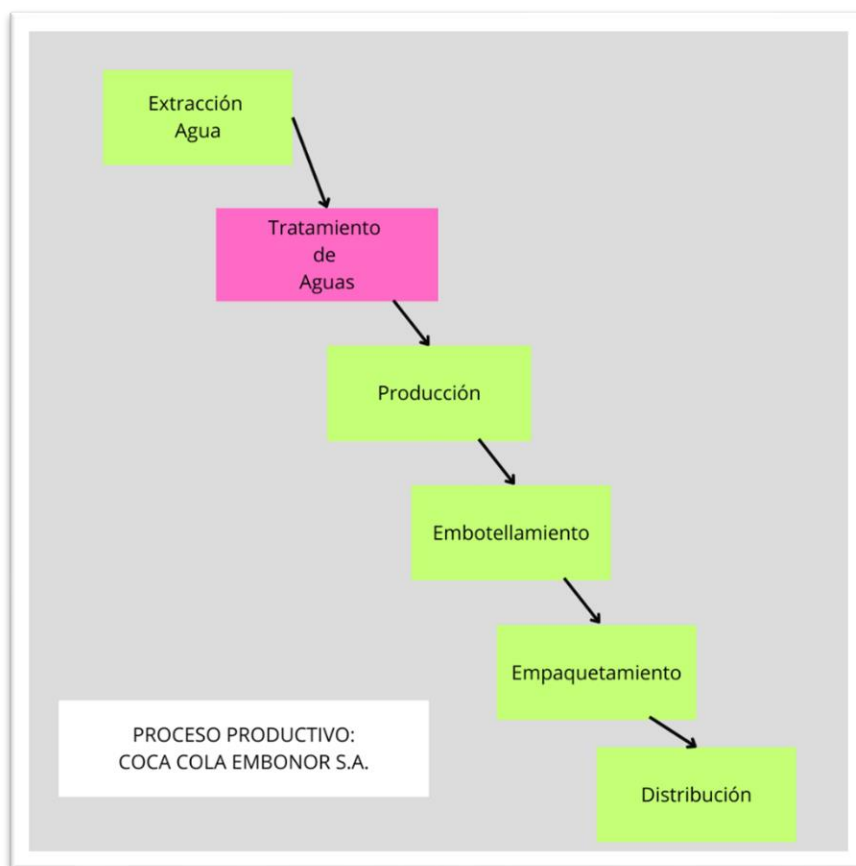


Imagen N° 2: Proceso productivo – Coca Cola Embonor S.A. – Se destaca en color rosado fluorescente el área en donde se está desarrollando proyecto de pasantía 2023 (Ref. N°17. Anexo N°7: Proceso productivo Coca Cola Embonor S.A.).

Una vez el agua cruda llega a la planta de tratamientos, por medio de tuberías, pasa por diversos procesos de depuración, entre ellos: Cloración, filtrado con arena verde (Green Sand Plus), nanofiltración, filtrado con carbón activado, osmosis inversa, filtrado UV (Para más información consultar Anexo N°1: Diagrama de flujo planta tratamientos de aguas).

Cloración	-	Oxidación fierro y manganeso
Filtrado con arena verde	-	Remoción Fierro y Manganeso
Nanofiltración	-	Abatimiento de sales y reducción de TDS
Filtrado con carbón activado	-	Remoción de cloro y compuestos órgano - eléctricos
Ósmosis inversa	-	Reducción de TDS

Tabla N°1: Procesos de tratamiento – Función [Términos generales]

La operación en conjunto tiene como objetivo controlar la concentración de contaminantes y parámetros de composición del agua, para así, cumplir con los requerimientos establecidos previamente por “Coca Cola Company”.


 <p>Estándar Agua Potable Coca Cola Company</p>	<p>[Fe] < 0,1 [ppm] [Mn] < 0,05 [ppm] [Cl]: 0,2 a 3 [ppm] TDS < 500 ppm Al M < 85 [ppm] Ph > 4,9 Turbidez < 0,3 [NTU]</p>
--	---

Imagen N°3: Estándar requerido agua potable coca cola para producción, servicios de producción y servicios básicos. (Revisión Ref. 16 Anexo N°8: Estándar Agua potable Coca Cola Company).

El proceso por intervenir específicamente es el filtrado con arena verde, esta operación consiste en la filtración a través de diferentes medios dispuestos de manera decreciente en tamaño para lograr remover en la mayor medida posible las concentraciones de contaminantes presentes en el agua. En este caso, el medio granular de Arena sílica está recubierta con dióxido de manganeso lo que genera oxidación de Hierro y manganeso (las cargas de medios filtrantes son: 4300 [kg] Piedra huevillo, 3000 [Grava] y 4700 [kg] Green Sand Plus). Así es como tres filtros, dos en operación y uno en fase estacionaria listo para ser usado permiten mantener un caudal entrante de 100 [m3], para comenzar su proceso de tratamiento. En la operación se añade permanganato de potasio un agente oxidante externo que necesario para realizar la modalidad de regeneración continua: Al mismo tiempo que se oxida en mayor medida manganeso y fierro por la reacción de KMnO_4 también se regenera el medio filtrante.

Se presenta la siguiente problemática; en el área de operación filtrado con arena verde (Green Sand Plus), se observa una elevada concentración de manganeso en el caudal de entrada, el cual supera los límites planteados como parámetros de operación, lo que finalmente afecta al desempeño en términos tiempo y efectividad. La relevancia de cumplir con los parámetros dispuestos por el proveedor radica en que, el proceso tiene una duración más acotada, por lo tanto, necesita un mayor monitoreo y genera la utilización de más agente oxidante de Permanganato de Potasio para la reacción química y aumenta el agua diaria utilizada en el retro lavado de los filtros. En términos prácticos; dentro de las temáticas que se tratan en la ficha técnica proveedor marca “Green Sand Plus” - “COTACO”, se entrega información específica sobre la concentración máxima de operación de fierro y manganeso. Su diseño tiene como límite 5 [ppm] de fierro y 3 [ppm] de manganeso para realizar de forma efectiva el proceso. Por esta razón el tiempo de carrera teórico correspondiente a su capacidad, 248 a 338 [min], se ve disminuido constantemente en la práctica a 180 - 195 [min], a continuación, se presenta la formulación de cálculo tiempo de carrera filtros arena verde:

Tiempo de operación/carrera de filtro: Se define como la duración de la operación de filtrado, por lo tanto, indica en cuanto y en que medida se está saturando el medio.

Mediante Manual COTACO 2023 e investigación, se calcula a través de la siguiente formulación:

$$\text{Demanda KMnO4} = 0,2 \times [\text{Fe}] + 2 \times [\text{Mn}]$$

$$\text{Tasa de servicio} = (\text{Caudal} / \text{área efectiva de filtrado}) [\text{m/h}]$$

Finalmente:

$$\text{Tiempo de carrera} = [(\text{Capacidad} / \text{Demanda de KMnO4}) / (\text{Tasa de servicio})] - [\text{h}]$$

La situación se puede evidenciar en los dolores que genera la problemática dentro de la organización:

- Costo para duplicar agente oxidante permanganato de potasio [KMnO₄]: Estudio técnico desarrollado por proveedor “COTACO” entrega como solución a la sobrecarga de concentraciones en [Mn] duplicar la concentración de preparación de mezcla para inyección y utilizar dos bombas dosificadoras con caudales más grande y mayor presión (0 a 10 Bar) a un 80% de capacidad y 80% de pulsos. Es por ello, que en la actualidad se tiene una demanda

del doble de concentración 22 [ppm] y se duplica la inyección. Económicamente esto se expresa en un costo de \$335.016 por mes. La brecha se encuentra en que a concentraciones normales de operación 2,9 [ppm] como es estipulado en la ficha técnica del medio filtrante (estándar mínimo menor a 3 [ppm]), la dosificación necesaria asume un costo de \$217.800 por mes. Se está comprando en exceso \$117.216 de permanganato debido a la problemática planteada. Cabe mencionar que este análisis está dimensionado por filtro no los tres filtros en conjunto.

El cálculo se plantea de la siguiente manera, mediante “Hoja de cálculo dosificación de permanganato de potasio y tiempo de carrera filtros arena verde”. Es posible, obtener el flujo másico necesario de agente oxidante a partir de los contaminantes de entrada. (Información presentada en ficha técnica, entrega la cantidad de gramos necesaria para oxidar al manganeso con Permanganato de potasio). Teniendo los gramos que deben ser dosificados por hora, se ocupa el dato práctico de 200 [min] para observar el tiempo en que se utilizan las bombas dosificadoras, eso se multiplica por dos ya que existen dos carreras diarias. Al multiplicar el flujo másico correspondiente por las horas de operación se obtiene los gramos utilizados en un día de operación, por lo tanto, los kilogramos. Así es como al multiplicar por 30 días se obtiene la cantidad, en kilogramos, que se está dosificando al mes. Tomando en cuanto que cada kilogramo de KMnO_4 está a \$4.000 pesos se obtiene los cálculos.

- Aumento de agua para retro lavar los equipos: Es necesario destinar más agua al limpiar el filtro a través de un lavado inverso que aumenta la presión y elimina la saturación de contaminantes. El volumen de agua correspondiente es de 360 [m³] al día por filtro si se analiza como operación en conjunto son 1.080 [m³] al día que se gastan para realizar retro lavados de los equipos. El cálculo se basa en los flujos entregados por las tres bombas encargadas del caudal de entrada para el retro lavado de los filtros (150 [m³] cada una), además se realizan pruebas con flujómetro de resonancia magnética para obtener datos prácticos. Esa agua pasa por un proceso de recuperación posterior y se hacen 8 retro lavados por día.
- Disminución de disponibilidad del filtro para uso: De la misma manera al estar constantemente retro lavando los equipos, no es posible su utilización por los operadores. Lo cual no permite enviar más agua para producir bebidas o agua embotellada posterior a la planta. Tomando en cuenta que el tiempo de operación observado en los filtros es de 190

[min] en promedio y que teóricamente se calcula de 248 a 348 [min] a una concentración a un 70% arriba de los niveles estipulados de manganeso, existen una brecha entre lo teórico y la operación actual. Esta brecha incrementa mayor medida cuando se hace una comparación con el estándar mínimo del filtro 3 [ppm], en donde el tiempo de operación calculado es de 281 a 481 [min].

- Mayor uso de horas hombre para atender los filtros: Los operadores de la planta necesitan estar pendientes de la calidad del agua lo que les imposibilita realizar otras labores con la misma prioridad de importancia. En la actualidad se necesitan mínimo diario 4 [h] y en el estándar requerido debería ser 1 [h].

Es a partir de esto que tanto los dolores, como la problemática nos presentan una opción de mejora, una oportunidad de optimización del proceso.

2. Objetivos:

El objetivo principal de este proyecto es disminuir la concentración de manganeso en el flujo de entrada del sistema, para prolongar el tiempo de operación y mejorar el proceso de filtración con arena verde, en un periodo de 6 meses.

Los objetivos específicos para lograr generar mejoras son:

- Identificar la causalidad de la elevada concentración en el agua de manganeso en el agua: Para lograr encontrar una solución es necesario saber de que manera y en qué estado de la materia se encuentra el contaminante analizado, para así abordar el problema desde su raíz usando el método de remoción adecuado.
- Obtener una caracterización integral del funcionamiento de los filtros y los parámetros de operación actuales: Para estudiar en profundidad el procedimiento es necesario investigar la materialidad, las cargas, reacciones químicas y capacidad del filtro a través de su manual.
- Modificar el circuito de la planta: Es necesario rediseñar la manera en que se está tratando el agua para lograr disminuir la concentración de manganeso.

3. Estado del arte:

Hoy en día la problemática planteada se resuelve a través de diversos procesos y tecnologías. La concentración de manganeso en el agua es una cuestión que afecta a la extracción del recurso hídrico en napas subterránea a nivel global, es por ello por lo que, dependiendo de parámetros

como; disponibilidad de espacio, concentración del contaminante, caudal de entrada, volúmenes de agua y capacidad de carga de la inversión, se puede resolver de distintas maneras operando de forma contingente a la situación en específico. Para realizar abatimiento de manganeso en el mundo existen:

- Filtrado de arena verde: Proceso analizado en profundidad anteriormente y que se está utilizando en planta de tratamiento de aguas; a través de reacción de oxidación se remueve el manganeso disuelto en el agua para ser precipitado en su forma sólida y con ello retirado (Ref. N°6).
- Cloración mediante hipoclorito de sodio: La inyección de este agente oxidante se utiliza en el tratamiento de aguas para remover manganeso y fierro a través de proceso químico, que genera un precipitado. Este se puede purgar o filtrar. Si se quiere lograr la máxima remoción posible es necesario realizar ambas técnicas. En ese sentido, es necesario un tiempo de contacto mínimo 30 [min], contar con el equipo necesario para lograr decantar el precipitado y purgarlo. Posteriormente se filtra.
- Bioadsorción por cápsulas de *Moringa Oleifera*: Este vegetal es ampliamente conocido por su capacidad bio - adsorbente de contaminantes. A través de la molienda de semillas de la planta, que se encuentran en sus vainas, se producen cápsulas con una concentración específica que al ser disueltas en una mezcla de 4,5 [ppm] de manganeso “logra un 95% de remoción, el resultado es tomado en diferentes tiempos, todos ellos evidencian una gran capacidad de abatimiento, en un tiempo de 15 [min]” (Ref. N°4)
- Utilización de otros medios filtrantes: Existen diversos tipos de medios filtrantes. Se utiliza otra de las mejores alternativas del mercado Katalox Light. Mediante una prueba piloto desarrollada en la zona trasera de la planta, se pone a prueba medio filtrante actual y medio filtrante nuevo conectado directamente al estanque de agua de pozo. Se concluye que el tiempo de carrera y la capacidad filtrante de producto Green Sand Plus es mayor que Katalox Light. La metodología implementada es una simulación en escala menor en comparación a los filtros, sin embargo, sigue la misma funcionalidad y procedimiento. *(Método experimental fue realiza por empresa VigaFlow en conjunto con Coca Cola)*
- Agente oxidante dióxido de cloro: La utilización de este oxidante logra mayor eficacia cuando se trata de remover manganeso y hierro. La comparación se presenta de la siguiente manera: “1 [g] de dióxido de cloro es capaz de oxidar 2,45 [g] de manganeso y 1,21 [g] de fierro”. La inyección se realiza a través de bomba dosificadoras con un mayor

protocolo de seguridad debido a los riesgos que compromete el uso de este. En modo “comparativo 1 [g] permanganato de potasio oxida 1,92 [g] de manganeso y 0,91 [g] de fierro. Por lo tanto, existe una mayor capacidad de remoción” (Ref. N°6).

Es posible evidenciar que existen, actualmente, diferentes maneras de darle solución al problema presentado, ya que, la remoción de hierro y manganeso son procesos bastante analizados durante las últimas décadas.

4. Solución propuesta:

Posteriormente al análisis planteado, se presenta la propuesta de solución a implementar: Para resolver la problemática se propone el **diseño de un decantador lamelar**. Este se añade al circuito de operación entre los puntos pozos N°2 y estanque agua de pozo. La finalidad radica en la purga de precipitado generado por la oxidación existente. La reacción química generada por el hipoclorito remueve los contaminantes que se encuentran disueltos para precipitar en estado sólido y finalmente ser eliminados en forma de lodo.

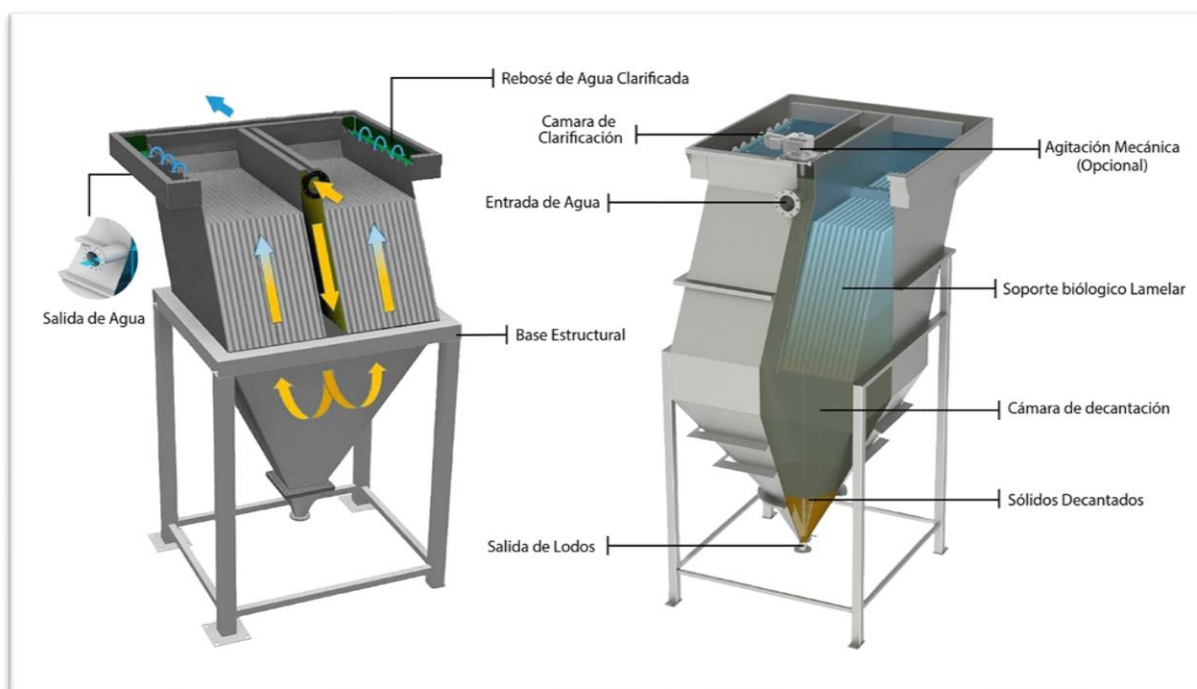


Imagen N° 4: Solución propuesta – Decantador lamelar – Se describe su funcionalidad de la siguiente forma: Entra agua contaminada en sentido de la gravedad, para posteriormente decantar una corriente contra gravedad. Pasando así, por el soporte lamelar que se encuentra de manera diagonal

dirigiendo el precipitado a la zona de purga de lodos. Las placas laminares aceleran la velocidad de decantación (imagen de representación diseño específico se expone posteriormente).

Se desarrolla el diseño y dimensionamiento del decantador lamelar planteado anteriormente mediante la bibliografía estudiada. Para ello, se realiza una recopilación de datos cruciales para el cálculo de las diferentes áreas y zonas del dispositivo de sedimentación, se presentan a continuación la formulación utilizada:

Cabe mencionar que la operación se calcula proyectando la utilización de tres filtros en paralelo debido a la baja concentración se que alcanzará mediante la decantación laminar.

- Caudal entrada: $150 \text{ [m}^3/\text{h}] = 0,04 \text{ [m}^3/\text{s}]$
- Velocidad de decantación: $0,001 \text{ [cm/s]}$
- Separación placas: 12 [cm]
- Ángulo inclinación placas: 60° (medida máxima para optimizar velocidad de decantación de manera efectiva).
- Área superficial zona de decantación: $(\text{Caudal}) / (\text{factor angular} * \text{velocidad de decantación})$
 Entonces: $A_s = 0,04 / (5,55 * 0,001) = 6,55 \text{ [m]} \text{ se aproxima a } 7 \text{ [m]} \text{ para obtener capacidad de respuesta ante un incremento de caudal o concentración de contaminantes.}$
- Longitud útil placas: $(\text{Longitud tubo}) - (\text{separación placas} * \cos(\text{ángulo inclinación placas}))$
 Entonces: $L_u = 120 - (12 - \cos(60^\circ)) = 1,14 \text{ [m]}.$
- Número de placas eje x = $(\text{eje horizontal } A_s) * (\text{separación placas})$
 $N_x = 29,1 \text{ [unidad cantidad de placas]} \text{ se aproxima a } 29 \text{ placas.}$
- Número de placas eje y = $(\text{eje vertical } A_s) * (\text{separación placas})$
 $N_y = 16,6 \text{ [unidad cantidad de placas]} \text{ se aproxima a } 17 \text{ placas.}$

Los diferentes parámetros analizados dentro del cálculo de dimensionamiento nos entregan la siguiente configuración en el diseño del dispositivo: En primer lugar, un volumen total de $42 \text{ [m}^3]$ en donde el largo es 7 [m] , el ancho 2 [m] y la altura 3 [m] . La materialidad de estanque como tal es fibra de vidrio de 15 [cm] para lograr aguantar la presión de agua correspondiente, las tuberías utilizadas son de 6 [pulgadas] y las placas laminares son de PVC recubiertas con lonas de vinilo.

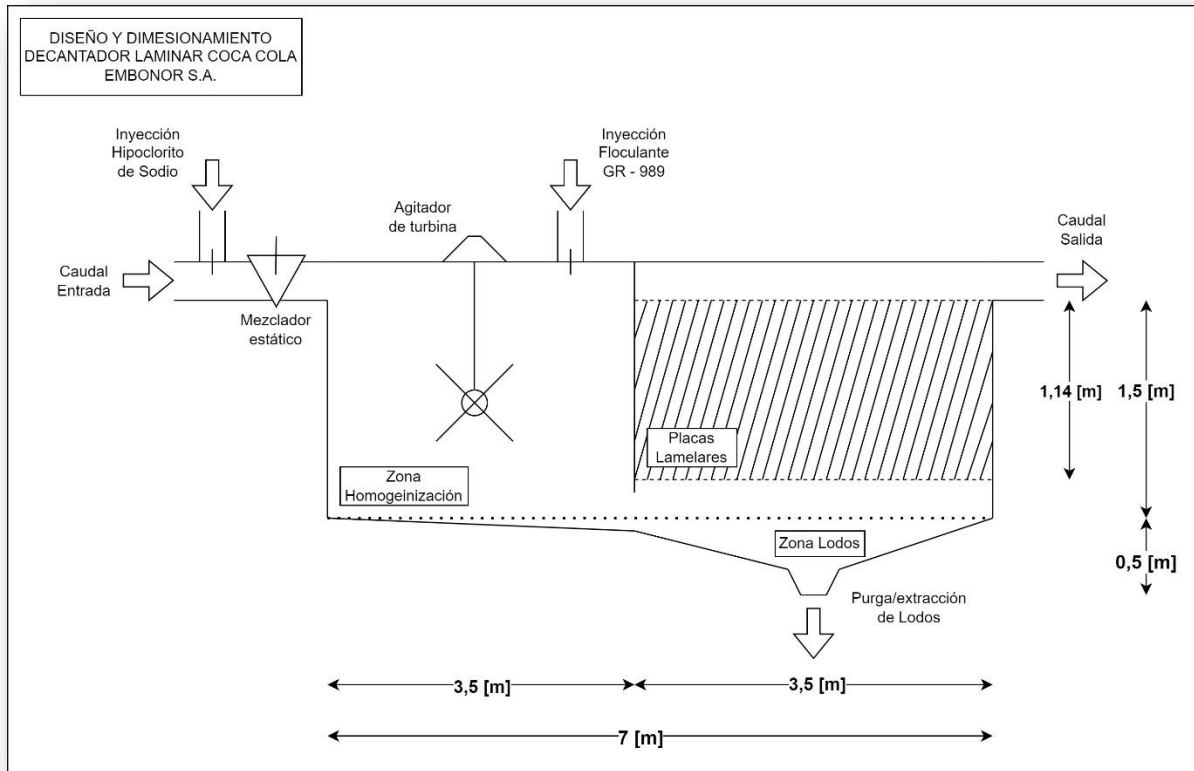


Imagen N°7: Diseño y dimensionamiento decantador lamelar – Se presenta un plano que pretende diagramar la operación por etapas. Tiene un corte transversal, en donde es posible diferenciar las diferentes zonas calculadas para el equipo – Primeramente, tenemos un caudal de entrada por donde ingresa el agua clorada y mezclada al decantador – Luego el agua ingresa a la primera cámara de esta configuración en donde el agua es agitada lentamente con el fin de ser homogeneizar la mezcla de Hipoclorito de Sodio, agua y floculante GR – 989 en las mismas dosificaciones analizadas anteriormente. Otro objetivo de esta primera zona es para generar en el movimiento del agua un flujo menos turbulento y más laminar, en ese sentido disminuir el número del Reynolds – Posteriormente al paso por esta primera zona encontramos la zona de lodos en donde se irá acumulando y purgando los lodos de manganeso y fierro oxidado junto con otro tipo de sólidos suspendidos – Por último, encontramos la zona de placas lamelares que están a una inclinación de 60° es ahí justamente donde la velocidad de decantación aumenta y se realiza este proceso. Para finalmente salir del sistema continuo. (Base de cálculo realizada a través de literatura para más información revisar Ref. N°9 y 10).

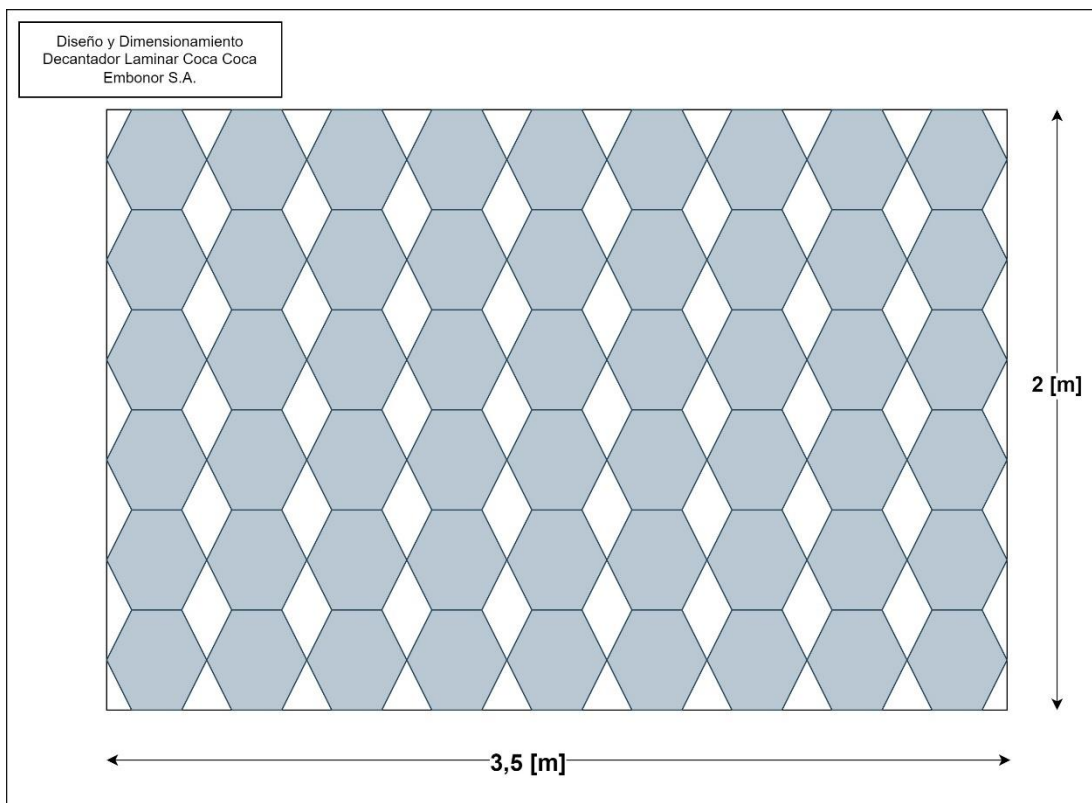


Imagen N°8: Representación gráfica plano superior de Área transversal placas de sedimentación. Como se mencionó anteriormente las placas serán horizontalmente 29 unidades y verticalmente 17 unidades.

Los criterios utilizados para escoger esta propuesta en específico se resumen en los 4 puntos siguientes:

- A) Purga de precipitado: Se concluye firmemente que, al decantar y purgar el precipitado de los contaminantes, después de su oxidación, presente en el agua es completamente necesario y altamente efectivo para bajar la concentración de manganeso antes del filtro de arena verde.:
- B) Volumen de agua requerido: La solución más apropiada en consideración del gran caudal de agua entrante 150 [m3]
- C) Optimización espacio disponible: Tomando en cuenta el espacio disponible en planta de tratamiento de aguas, es razonable optimizar el espacio y utilizarlo para dar solución a una problemática importante.
- D) Efectividad: Tomando en cuenta la experimentación piloto realizada por los filtros de papel, existe una gran eficacia en remoción de manganeso, eso se traduce en la necesaria decantación.

5. Evaluación económica:

La inversión necesaria para la implementación de este proyecto se formula de la siguiente manera:

- Estanque volumen 42 [m³] con separación en el medio fibra de vidrio 15 [cm] de espesor: \$22.000.000.
- Soporte estructural acero 3 [mm] de grosor: \$10.000.000.
- Construcción fundaciones soporte estructural: \$7.000.000.
- Maquinaria construcción en suelo: \$4.000.000.
- Construcción módulo lamelar empresa Tekwater Chile, modelo LAM – FS41.62: \$4.000.000.
- Construcción escalera acceso a decantador: \$2.000.000.
- Compra de cemento fresco para realizar trabajos de fijación: \$2.000.000
- Transporte materiales y equipos: \$1.500.000.
- Sistema eléctrico de alimentación: \$1.000.000.
- Compra cañería 6 [pulgadas] con 3[mm] de grosor 10 metros: \$900.000
- Compra mezclador estático: \$500.000.

La inversión total en términos generales investigados en profundidad es de \$54.900.000 tomando en cuenta todos los procesos que conlleva la construcción de un decantador.

Por otro lado, el ahorro que se genera tomando en cuenta un 73% de disminución en la concentración de manganeso. Es posible decir que la situación que este proceso proporcionaría al agua permitiría ahorrar al mes un monto de \$240.272 por filtro de arena verde. Si esto se analiza como operación conjunta el ahorro mensual en agente oxidante Permanganato de potasio es de \$750.816. El cálculo de aquello viene dado del flujo másico a las concentraciones obtenidas en los experimentos de decantación piloto. Mediante estos datos es posible realizar un estudio de TIR en un periodo de 7 años de implementación, que es cuando ya ha sido recuperada la inversión e incluso fue superada. Lo que nos entrega un valor de 14,61% al ser recursos propios el capital utilizado con que sea mayor a 0 significa rentabilidad suficiente.

6. Metodologías:

La problemática e investigación, se abordará a través de diferentes pasos sucesivos correspondientes al proceso que se esté estudiando en particular, de la siguiente manera:

- Realizar análisis de las concentraciones de los contaminantes: Se toman muestras para analizar [Mn], [Fe], [Cl] y pH, durante el primer mes, en periodos de 2 horas exceptuando los fines de semana. Se observa en promedio que la espectrofotometría entrega los siguientes resultados 4,90 [ppm] de manganeso, 1,00 [ppm] de hierro y 2,00 [ppm] de cloro.
- Las muestras son obtenidas directamente de la salida del estanque agua pozo, para luego ser sometidas a prueba de espectrofotometría lo que involucra un método experimental específico casos (los cuales son explicados posteriormente). La concentración de cloro libre analiza en qué medida la oxidación generada se relaciona con las concentraciones de los contaminantes.
- Medición de flujo de los equipos: Se obtiene mediante un flujómetro de resonancia electromagnética el caudal de aguas tratadas así se tiene idea de cuánta agua se está destinando a cada operación. Esto conlleva el estudio de manual para el correcto uso de la herramienta, tomando en cuenta distancia entre perturbaciones simulando en lo más cercano a un flujo laminar. Se debe analizar el concepto de “aguas arriba” y “aguas abajo” con el fin de lograr una medición lo más fidedigna posible.
- Desarrollo de Excel analítico de dosificación KMnO₄: Se genera una planilla práctica (adjunta a este documento) como hoja de cálculo para análisis de demanda y dosificación del agente oxidante, así calcular teóricamente los tiempos de carrera según la concentración específica de los contaminantes de entrada. Esto significó una búsqueda bibliográfica profunda y semanas de desarrollo. Por otro lado, se obtuvo el aforo de cada bomba dosificadora (*PULSAFEEDER* - *PULSATRON* - *SERIE E PLUS* - *MODELO LPK5*) en sus diferentes configuraciones de dos parámetros “Capacidad” y “Pulso”. El primero guarda relación con la cantidad dosificación y el segundo la rapidez de cada ciclo de inyección. Al tomar en cuenta estos datos, tabularlos y graficarlos, es posible, linealizar el comportamiento de la curva, con el fin de que la hoja de cálculo entregue según, las concentraciones de manganeso y hierro en la entrada del filtro, la configuración específica de cada bomba dosificador, en los tres primeros filtros de arena verde. El método experimental desarrollado, consiste en tomar el tiempo que demora la inyección de KMnO₄ disuelto a la concentración de preparación de la

mezcla, en un volumen de 50 [mL]. Posteriormente, se obtiene el flujo en [L/h] y se genera gráfico. Estas medidas fueron tomadas con los filtros en operación para así trabajar con datos que consideren la contrapresión del caudal al que se está inyectando 4,5 [bar] en promedio.

- Analizar nuevos datos obtenidos: Una vez se obtienen, recopilan y tabulan los datos es necesario comprender que significan, por qué se encuentran en ese nivel, la causa de ello junto con su oportunidad de mejora. Existe una alta concentración de contaminante, esto se debe a que los puntos de extracción proveen de agua contaminada.
- Revisión bibliográfica correspondiente: Se estudia la literatura con respecto a la temática específica, como manual de operación, ficha técnica de equipos, libros de mecánica de fluidos y estudios científicos de tratamiento de aguas.

Para lograr hacer estas mediciones se ocupa espectrofotometría, entre otros métodos de medición, se miden por un mes muestras de manganeos, fierro y cloro. Una vez analizado el comportamiento durante el día se toman muestras diarias. Se ocupa este método ya que es la manera más avanzada de lograr una medición exacta.

Los diseños experimentales se muestran a continuación:

- 1) Prueba de manganeso: Utilizar micropipeta recoger 5 [mL] de la muestra, para mezclar en un tubo de ensayo aclimatado con el agua en análisis. Se añaden tres reactivos en dosificaciones de 4 gotas para el primero, 2 gotas para el segundo (Esperar dos minutos de reacción) y 2 gotas para el tercero (esperar dos minutos de reacción). Finalmente realizar espectrofotometría en recipiente de 5 [mL] para rango alto.
- 2) Prueba de fierro: Utilizar recipiente 10 [mL] para recoger muestra, realizar grupo control presionando “zero” al mismo tiempo que ingresa muestra al equipo. Dosificar el reactivo, agitar. Agitar para homogeneizar la muestra y realizar prueba de espectrofotometría presionando “read” hasta que el contador comience.
- 3) Prueba de cloro libre: Utilizar recipiente 10 [mL] para recoger muestra, realizar grupo control presionando “zero” al mismo tiempo que ingresa muestra al equipo. Dosificar el reactivo, agitar. Agitar para homogeneizar la muestra y realizar prueba de espectrofotometría presionando “read” hasta que el contador comience.

(Específicamente para la concentración de manganeso [spectroquant - nova 60a], para el fierro [Hannah instruments - hi96721] y Cloro [HACH - DR300]. Las muestras tomadas y los datos que se presentan son el grupo control que servirá para comparar el proceso pre y post solución aplicada).

- 4) se analiza la preparación de mezcla de $[KMnO_4]$ para su posterior inyección, las pérdidas de presión y carga en la curva de las bombas dosificadoras, la misma presión de trabajo, su tiempo de retro lavado y operación, composición química del filtro. Finalmente, esto fue llevado a Excel para ser tabulado y analizado.
- 5) Procedimiento experimental filtros de papel y sólidos suspendidos: Al notar que en el fondo de los vasos precipitados siempre se encontraba hierro y manganeso acumulado. Por esta razón, se decide realizar método experimental de filtros de papel (para sólidos suspendidos), en donde la concentración evidencia una disminución alta e importante, lo que confirma la necesidad de purgar la precipitación de manganeso y fierro.

El método desarrollado en laboratorio consiste en filtrar a través del papel con una bomba de vacío el agua de pozo (agua que ya lleva una inyección de cloro). Es necesario agitar bien la muestra para lograr obtener una mezcla homogénea, y analizar de manera exacta la reducción de los contaminantes. Por último, se toman mediciones respectivas de espectrofotometría.

La experimentación evidencia resultados exitosos reduciendo las concentraciones de los contaminantes hasta en 3,25 [ppm] en manganeso y 2,10 [ppm] de hierro. Esto nos revela con toda certeza que el precipitado está afectado gravemente a las concentraciones de contaminantes, por lo tanto, lo importante que es lograr purgarlo. Tomando en cuenta que esto disminuye la capacidad filtrante del filtro y su tiempo de carrera.



Imagen N°5: Experimentación filtración con filtros de papel – Comprueba la presencia material particulado suspendido.

- 6) Procedimiento experimental decantación de sólidos suspendidos: Si bien la filtración con papel es un experimento que revela la remoción por contaminantes, esto no asegura su eliminación al decantar siendo dos fenómenos físicos distintos. Por otro lado, la velocidad de sedimentación entregará un volumen específico de agua, lo cual será un factor para analizar en la factibilidad de la implementación debido al lugar disponible.
- Para ello, se realizó un estudio de velocidad de decantación que nos entrega que las partículas decantan a $0,001 \text{ [cm/s]}$ (se adjunta Excel sobre la tabla y gráfico de los datos obtenidos). El experimento consiste simular la cloración existente en los estanques de agua de pozo (agua clorada), para ello, realizar un escalamiento a menor medida conservando las dosificaciones de Hipoclorito de Sodio $0,05 \text{ [mL]}$. Al mismo tiempo dosificar floculante (GR – 989) a la medida que se realiza en agua de recuperación (proceso efectivo dentro de la planta) $0,03 \text{ [mL]}$, para finalmente medir en un tiempo de residencia hidráulico de 30 [min] la altura del frente de decantación, al graficar y tener una ecuación de la recta la pendiente nos entrega el valor de velocidad.
- Una vez el tiempo ya transcurrió, se toman muestras a diferentes alturas del agua clarificada para llegar a la conclusión de que la decantación disminuye la concentración de

manganeso en 3,00 [ppm] y de fierro en 1,50 [ppm]. Esto confirma que el proceso físico/químico realizado con Hipoclorito y floculante fue un éxito y es una solución contingente a la situación.



Imagen N°6: Proceso de experimentación velocidad de decantación y contaminantes. Agua de estanque agua de pozo clorada [L] – Agua traspasada a cono de decantación minuto 0 – Agua clarificada por sedimentación de material particulado manganeso y fierro, minuto 30. Se toman muestras en la zona media del cono, para mantener una medida equidistante entre la zona de mayor concentración y menor concentración.

7. Medidas de desempeño:

Con el propósito de concluir que tan efectiva y cómo avanza la propuesta de solución se tomarán dos parámetros específicos de los filtros para comparar la situación actual con la futura:

- Concentración de contaminantes en caudal de entrada y salida del filtro con “Green Sand Plus”: A través de medición experimental de espectrofotometría explicada anteriormente, este resultado debería ser menor a 3,00 [ppm] llegando desde 1,00 a 1,30 [ppm]
- Tiempo de operación/carrera de filtro: El tiempo de operación se calcula mediante la operación matemática planteada en la introducción. Nos dará un resultado práctico de la eficiencia en la implementación de la solución en medida que este aumente se está llegando al resultado esperado: 645 a 1106 [min].

8. Planificación:

La planificación del proyecto se realiza por semanas, llevando a cabo los diversos experimentos e implementando las medidas correspondientes a la carta gantt. (Más información revisar Ref. N°15. Anexo N°5: Planificación semestral desarrollo proyecto pasantía).

9. Matriz mitigación de riesgos:

El planteamiento del proyecto conlleva ciertos riesgos al minuto de su desarrollo e implementación. Estos deben preverse y prevenirse para lograr cumplir con los objetivos presentados en un principio: Principalmente encontramos riesgos que tienen un mayor impacto que otros, por otro lado, cada uno tiene mayor o menor probabilidad de suceder. Lo más importante es contar con medidas específicamente enfocadas en mitigar estos riesgos, con el fin de anular la probabilidad de que ocurran.

EVENTO	PROBABILIDAD	IMPACTO	MITIGACIÓN
FALLA EN LA EXPERIMENTACIÓN PILOTO	MEDIA/ALTA	ALTO	RIGUROSIDAD EN METODOLOGÍA DE DESARROLLO
FALLA DISEÑO DECANTADOR LAMELAR	MEDIA/ALTA	ALTO	BÚSQUEDA CONTINGENTE DE BIBLIOGRAFÍA - MEDICIONES CORRECTAS
FALTA DE INSUMOS	BAJA	MEDIO	REVISIÓN STOCK CONSTANTE
TIEMPO DE DESARROLLO	MEDIA	BAJO	PLANIFICACIÓN

Imagen N°9: Matriz mitigación de riesgos – Se presenta el evento, su probabilidad, el impacto que este conlleva y la manera de mitigar estos posibles riesgos.

10. Resultados obtenidos:

Los resultados esperados para la solución planteada son reducir la concentración del caudal entrante a los filtros de arena verde en un mínimo de 70% lo que en promedio disminuiría el contaminante manganoso en una medida bastante menor al límite de concentración planteado. La

consecuencia inmediata es, en primer lugar, el aumento del tiempo de operación de 654 a 1106 [min] (más que el doble de la carrera actual). Al mismo tiempo se necesitaría una menor cantidad de permanganato de potasio debido a la baja en la demanda química necesaria de concentración. Eso significaría una baja en el costo mensual del agente oxidante a \$750.816 bajo los mismos cálculos mencionados anteriormente de flujo másico.

Se espera, en un escenario futuro, observar una mejora en el proceso de tratamiento de aguas, logrando mejores tiempos de operación y menos uso de agua para retro lavar los filtros de arena verde, que debería bajar de 1080 [m³] a 100 [m³] al día. De la misma manera debería bajar la hora hombre de 3 [h] actual mínimo a 1 [h], como parámetro de optimización.

11. Conclusiones y discusión:

Es posible concluir que la problemática existente en la planta de tratamiento de aguas Coca Cola Embonor, es la elevada concentración de manganeso presente en la entrada del primer proceso de filtración realizado dentro del circuito que se desarrolla con arena verde. Este proceso físico químico conlleva tanto la oxidación del hierro y manganeso, como posteriormente filtrar de manera mecánica la precipitación de estos contaminantes. Si bien hoy en día esto se resuelve de diferentes maneras y con diferentes métodos, la solución más factible es el diseño de un decantador laminar, esto se debe al espacio disponible y la capacidad de remoción que permite un dispositivo de estas características.

Se concluye que; es posible aumentar el tiempo de carrera este proceso a través de la remoción del precipitado generado por la oxidación del agua de pozo. Esta remoción es efectiva por medio del sistema planteado, formulado, diseñado y dimensionado, dando como resultado números favorables en los tiempos de carrera de 200 a 645 [min], un notable menor uso de aguas para retro lavar los equipos al día de 1080 a 100 [m³] y un uso de horas hombre que baja de 4 a 1 [h]. Los métodos experimentales entregan datos en donde la concentración de Manganeso disminuye en 3,6 [ppm] y en hierro 0,11 [ppm] lo que mediante el cálculo de tiempo de carrera entrega los números expresados en minutos.

12. Referencias:

1. Cornejo Ponce, L. (2009). Recursos hídricos y desarrollo socioeconómico en zonas áridas: Importancia y perspectivas de nuevas tecnologías aplicadas al tratamiento de aguas naturales y/o residuales. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 17(3), 285-287.
2. Reynolds, K. A. (2001). Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica. Latinoamérica, 48-49.
3. Salamanca, E. (2016). Tratamiento de aguas para el consumo humano. Módulo Arquitectura CUC, 17.
4. Revista CENIC, Rodríguez, Mirla; Flores, Saúl; Rangel, Maiella; Cubillán, Liz; Argotte, Alexandra, 2015, Un estudio de la remoción de manganeso (II) a partir de sistemas acuosos usando cápsulas de moringa oleífera como bioadsorbente.
5. Martínez, Magda y Montero, Edison (2014) Evaluación de remoción de hierro y manganeso en aireadores de toberas en la ciudad de San Juan de Pasto. Informe final de Trabajo de Grado. Universidad de Nariño, San Juan de Pasto.
6. Cotaco, (2020), Ficha Técnica: "Green Sand Plus".
7. VIDAL, K. G., & CASTRO, L. T. J. FLOCULADOR DE LECHO POROSO EN MATERIAL DE RELLENO PLASTICO.
8. Bracho, M., Callejón, A., Hernández, A. C., & Morales, F. (2012). EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE PRECIPITACIÓN DEL HIERRO Y MANGANESO DISUELTOS EN AGUA SUBTERRÁNEA UTILIZANDO AIRE O HIPOCLORITO DE SODIO COMO OXIDANTE. *Fundación de Investigación y Desarrollo de la Universidad Simón Bolívar*, 10.
9. Arboleda Valencia, Jorge. Teoría y práctica de los sedimentadores de placas inclinadas. Cali, ACODAL 89, 1979.
10. Richter, Carlos. Decantación. Curitiba, SANEPAR, 1986.
11. Anexo N°1: Diagrama de flujo planta tratamiento de aguas, Matías Mujica, agosto 2023.
12. Anexo N°2: Planilla dosificación permanganato de potasio y tiempo de carrera filtros arena verde, Matías Mujica, agosto, 2023.
13. Anexo N°3: Planilla análisis velocidad de decantación, Matías Mujica, noviembre, 2023.
14. Anexo N°4: Organigrama Coca Cola Embonor S.A., Matías Mujica, noviembre, 2023.
15. Anexo N°5: Planificación semestral desarrollo proyecto pasantía, Matías Mujica, diciembre, 2023.
16. Anexo N°6: Estándar Agua potable Coca Cola Company, Matías Mujica, septiembre, 2023.
17. Anexo N°7: Proceso productivo Coca Cola Embonor S.A. Matías Mujica, septiembre, 2023.