



Universidad Nacional de Córdoba
 Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales



PRACTICA SUPERVISADA

“FILTRACION RAPIDA”:
 Variación de los parámetros en el agua filtrada durante el período de maduración para filtros de lavado mixto

Estudiante: MELGAREJO, Maria Carolina
 Tutor: Ing. Civil Araujo Héctor.
 Supervisor Externo: Ing. Civil Fontana Guillermo

Septiembre 2018

AGUA POTABLE

AGRADECIMIENTOS:

Realmente hay muchas personas involucradas para agradecer. Primero quiero agradecer a la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales que lograron brindarme esta oportunidad.

También quiero agradecer a todo el personal de Aguas Cordobesas, especialmente a las personas de la Planta Suquia, las cuales desde el primer día que llegue me hicieron sentir muy cómoda, realmente es un ambiente de trabajo admirable. Entre ellos mis tutores Guillermo Fontana y Héctor Araujo, los cuales me guiaron al camino que quería llegar.

Como no podía faltar, quiero agradecer a mi familia la cual estuvo desde el día uno apoyándome y confiando en mí. Mis hermanas, que me ayudaron a que todo sea un poco más leve; y a mi mamá y papá que en la distancia supieron estar presente incondicionalmente.

En fin, cada persona que estuvo en este camino ayudo a que hoy pueda haber llegado y merece todo mi agradecimiento.



Universidad Nacional de Córdoba

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

“FILTRACIÓN RÁPIDA: Variación de los parámetros en el agua filtrada durante el período de maduración para filtros de lavado mixto”

RESUMEN:

El siguiente trabajo se desarrolla a partir del planteo de los objetivos generales y particulares de la actividad curricular realizada, los cuales marcan el lineamiento a seguir en el desarrollo de las tareas.

Luego el informe se divide en cuatro puntos generales: la teoría, el estudio de los filtros, las comparaciones y las conclusiones.

En la teoría se encuentra el proceso de potabilización en su totalidad de la Planta Potabilizadora Suquia, fundamentando el funcionamiento de cada etapa del proceso, para así lograr entender la operatividad de la planta.

En el estudio de los filtros se describe su funcionamiento, tanto durante su carrera como durante su lavado. Allí también se encontraron los ensayos realizados de la variación de turbiedad durante esos procesos.

Por otra parte, en el tercer punto se compararon los resultados obtenidos de los distintos filtros de la Planta Suquia, como así también se comparó los filtros de la Planta Suquia con los filtros de la Planta Los Molinos.

Finalmente se desarrollaron conclusiones de los estudios obtenidos y recomendaciones para lograr un mejor desempeño de acuerdo a los resultados alcanzados.

INDICE:

1. Objetivos de la metodología utilizada.....	1
1.1 Objetivos Generales.....	1
1.2 Objetivos Particulares.....	1
2. Introducción.....	2
3. Proceso de Potabilización.....	3
3.1 Objetivo.....	3
3.2 Fuentes de Agua Cruda.....	3
3.3 Circuito del Agua Cruda.....	4
3.4 Plantas de Aguas Cordobesas.....	4
3.5 Panta Potabilizadora Suquia.....	4
3.5.1 Pre-tratamiento.....	5
3.5.2 Coagulación.....	6
3.5.3 Floculación.....	7
3.5.4 Decantación.....	8
3.5.5 Filtración.....	9
3.5.6 Desinfección.....	11
3.5.7 Alcalinización.....	12
4. Teoría de Filtración	
4.1 Objetivos.....	14
4.2 Proceso de filtración.....	14
5. Tipos de filtros	
5.1 Clasificación de filtros.....	17
6. Filtro de la Planta Potabilizadora Suquia	
6.1 Filtros AQUAZUR V.....	20
6.2 Partes de un filtro.....	21
6.3 Funcionamiento del filtro.....	25
6.4 Fases de un ciclo de Filtración.....	26
6.5 Procedimiento del muestro de turbiedad bajo filtro.....	27
6.6 Ensayos de turbiedad y colmatación bajo filtro.....	30
7. Lavado de Filtro	
7.1 Lavado con Flujo Ascendente.....	41
7.2 Hidráulica de lavado.....	43
7.3 Reciclaje de las aguas de lavado.....	44
7.4 Procedimiento del muestreo de turbiedad durante el lavado del filtro.....	45
7.5 Ensayos de turbiedad durante el lavado.....	47
7.6 Control del proceso de filtración.....	58
8. Comparaciones	
8.1 Planta Los Molinos.....	59
8.2 Planta Formosa.....	66
8.3 Planta Pirané – Formosa.....	69
9. Conclusiones.....	74
10. Propuestas operativas para optimizar el funcionamiento.....	76

1- Objetivos de la metodología utilizada

El siguiente trabajo está basado en la experiencia profesional dentro del marco regulador general de la actividad curricular denominada "Práctica Supervisada (PS)". El mismo está desarrollado con el fin de poder cumplimentar la última etapa de la carrera de Ingeniería Civil satisfaciendo los siguientes objetivos:

1.1- Objetivos Generales:

- ✓ Brindar al estudiante experiencia práctica complementaria en la formación elegida, para la inserción en el ejercicio de la carrera.
- ✓ Aplicación, profundización e integración de los conceptos adquiridos durante el cursado de la carrera de Ingeniería Civil.
- ✓ Introducir en forma práctica al alumno en los métodos reales y códigos relativo a las organizaciones laborales y a las actividades que estas desarrollan.
- ✓ Contacto y experiencias con la aplicación y/o utilización de nuevas tecnologías.
- ✓ Orientación del alumno respecto a su futuro ejercicio profesional.
- ✓ Desarrollar actividades que refuercen la relación Universidad – medio social, favoreciendo el intercambio y enriquecimiento mutuo.
- ✓ Redactar informes técnicos convenientemente fundamentados a cerca de una determinada práctica profesional y sus conclusiones.

1.2- Objetivos Particulares:

- ✓ Profundizar en operación de la planta potabilizadora el comportamiento de los distintos parámetros del agua a la salida de un filtro rápido de lavado mixto.
- ✓ Lograr un aprendizaje continuo y permanente durante las horas de trabajo, a fin de conseguir una primera mirada al ejercicio profesional, enfatizando la correlación entre los conceptos aprendidos durante los estudios académicos y los adquiridos durante el desarrollo de los trabajos profesionales.
- ✓ Sumar antecedente ante una eventual salida laboral, adquiriendo los conocimientos básicos necesarios para el correcto desempeño futuro.

2- Introducción:

La práctica realizada consiste en el estudio del comportamiento de los distintos parámetros del agua a la salida de un filtro de lavado mixto, en la **Planta Potabilizadora Suquia**, ubicada en Córdoba Capital. La misma abastece a la zona noreste de la ciudad y cubre al 70% de la población.

Se considera un parámetro como representativo para el estudio de su comportamiento, y dicho parámetro es la **Turbiedad** (medida de la transparencia del agua, causada por la presencia de materias en suspensión como arcilla, materias orgánicas e inorgánicas finamente divididas)

Esta práctica se lleva a cabo en tres fases:

- ✓ La primera fase que consiste en el relevamiento y marco teórico de la Planta Potabilizadora; en la que se aborda conocer en detalle el funcionamiento de la planta y sus fundamentos teóricos.
- ✓ La segunda fase se basa en la toma de muestras de los distintos filtros de la planta, tanto durante su carrera como durante el lavado del filtro, y posteriormente su estudio de turbiedad en la muestra. También se fundamenta el resultado en cada caso.
- ✓ Y finalmente en la tercera fase se realizan las comparaciones de la variación de turbiedad en cada filtro, y cuál sería el comportamiento más adecuado para obtener una buena calidad del agua ahorrando tiempo y recursos.

3- Proceso de Potabilización

3.1- **Objetivo:**

El proceso de potabilización de agua es un proceso que se lleva a cabo sobre cualquier agua para transformarla en agua potable y de esta manera hacerla absolutamente apta para el consumo humano.

3.2- **Fuentes de Agua Cruda:**

El agua cruda proviene de dos embalses: el “Embalse San Roque” el cual tiene un volumen de 200 Hm³ y un nivel de vertedero de 35,30mts; y el “Embalse Los Molinos”, el cual tiene un volumen de 300Hm³ y un nivel de vertedero de 53 m.

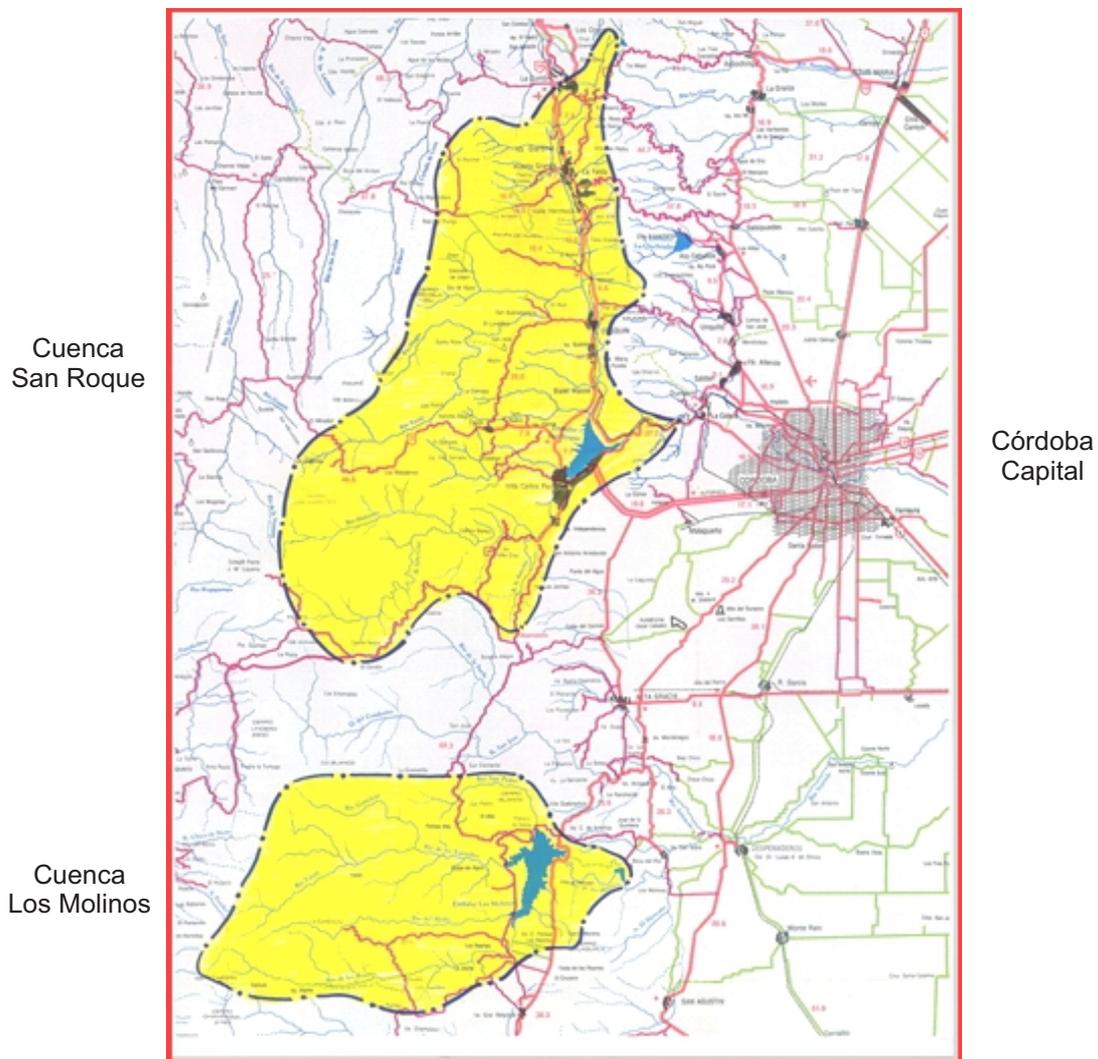


Fig N°1: Cuencas proveedoras de Agua Cruda

En dicha imagen se observa en la zona noreste la influencia de la cuenca del Embalse San Roque, y al sur la cuenca del Embalse Los Molinos

3.3- Circuito del Agua cruda:

El agua cruda es aquella agua natural sin ningún tratamiento previo, proviene de las lluvias que se producen en cada cuenca y son conducidas en Formosa natural hasta los Embalses por medio de arroyos y ríos. En su recorrido arrastran partículas de suelo, restos de vegetales y microorganismos. Dicha agua no es apta para el consumo humano.

✓ Características Principales del Agua Cruda:

- Tiene sustancias disueltas, finamente divididas y discretas, y microorganismos, entre los cuales se encuentran las algas.
- Las sustancias pueden ser de origen mineral u orgánico.
- Todo esto le otorga, entre otras cosas Turbiedad, color y olor.

3.4- Plantas de Aguas Cordobesas:

Aguas Cordobesas, quien es el ente prestador de agua potable en la ciudad de Córdoba, cuenta con dos plantas potabilizadoras para satisfacer la demanda de la ciudad. Una de ellas en la Planta potabilizadora Suquía la cual abastece el noreste de la ciudad y luego la Planta potabilizadora Los Molinos que abastece el centro y sur de la ciudad.

✓ Suquía

- Capacidad Instalada 5,5 m³/seg.

✓ Los Molinos

- Capacidad instalada 2 m³/seg.

3.5- PLANTA POTABILIZADORA SUQUIA:

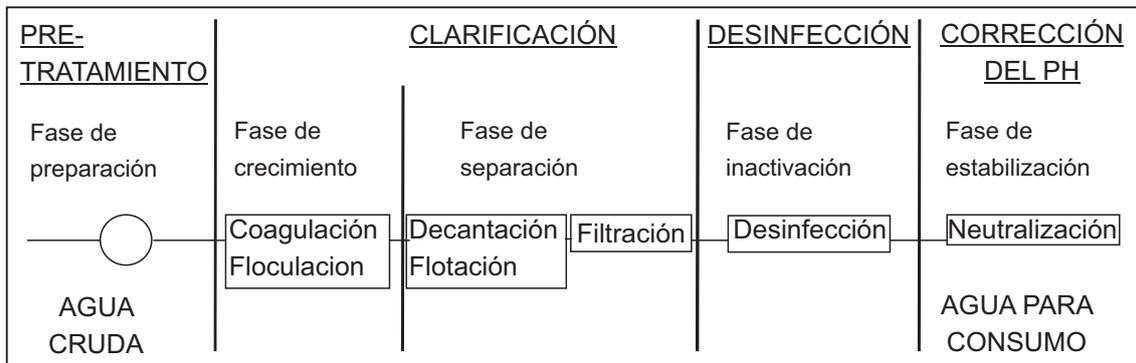
En el Embalse San Roque existe una toma de agua que se encuentra a 22 m del vertedero, y es conducida hasta la Central San Roque de EPEC, por medio de dos tuberías de acero de 2 m de diámetro cada una. EPEC (Empresa Provincial de Energía de Córdoba) turбина el agua cruda para obtener energía eléctrica, y luego la restituye al Río Suquía y circula por éste hasta el Diquecito. Desde el Diquecito a La Calera, el agua cruda es conducida por una combinación de conductos forzados y canales a cielo abierto.

Las tomas Alto Alberdi y Suquía están ubicadas en el canal de fuga de la Central Hidroeléctrica La Calera. En cada una de las tomas hay un Sistema de rejas manuales y compuertas. El agua llega a Planta Suquía por conductos forzados, parte en túnel y otra en cañerías.

En la siguiente imagen se observa la planta potabilizadora Suquia:



El proceso de potabilización con la cual cuenta dicha planta es:



3.5.1- Pre-tratamiento:

En primera instancia se cuenta con un pre-tratamiento físico en la planta, el cual consta de rejas gruesas y rejas finas al ingreso del agua cruda, de manera de retener partículas de suelo, restos de vegetales y todos aquellos elementos sólidos de tamaño mayor al diámetro de las rejas.

También se cuenta con una sala de pre-oxidación con una Planta de Ozono, es un pre-tratamiento químico, el cual se encuentra luego de las rejas finas. Lo que genera este tratamiento es una mejora de los parámetros del agua cruda (remoción de materia orgánica, color, sabor, entre otros).



Foto N° 2: Batería de Bombas de Agua Cruda



Foto N° 3: Planta de Dosificación de Ozono



Foto N°4: Almacenaje de Oxígeno Liquido

3.5.2- Coagulación: (mezcla rápida)

La coagulación es un proceso químico en el cual se neutralizan las cargas de los coloides mediante el agregado de un producto químico denominado coagulante. Los coagulantes principalmente utilizados son las sales de aluminio y/o de hierro, y polímeros orgánicos denominados polielectrólitos catiónicos.

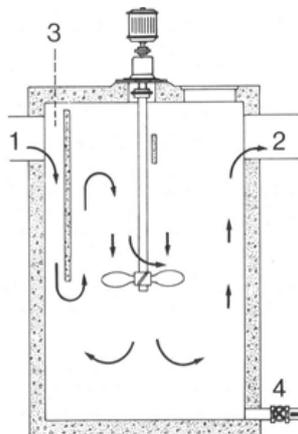
La Dosis de Coagulante depende de las características del Agua Cruda:

- ✓ Turbiedad
- ✓ Materia Orgánica
- ✓ Cantidad de Algas
- ✓ Color
- ✓ Materia en Suspensión
- ✓ Contenido de Sales
- ✓ Temperatura
- ✓ Reaccionan con la alcalinidad el agua cruda a un pH determinado

El producto químico que se utiliza en la planta para la coagulación es el **Sulfato de Aluminio Líquido Base**. La dosificación del sulfato de aluminio se realiza introduciendo de una sola vez el coagulante en toda la masa de agua cruda. El tiempo de reacción del coagulante con el agua cruda debe ser muy corto, por lo que la mezcla para lograr la dispersión debe realizarse utilizando gran cantidad de energía, la que puede ser hidráulica o mecánica; en planta la mezcla es hidráulica.



Foto N° 5: Almacenaje de Sulfato de Aluminio Líquido



- Referencia:
- 1- Entrada de agua
 - 2- Salida de agua
 - 3- Reactivo
 - 4- Vaciado

Foto N° 6: Camara de mezcla con agitador rápido

3.5.3- Floculación: (mezcla lenta)

La floculación es un Proceso que tiene como objetivo aglutinar las partículas, para aumentar el tamaño de las mismas y para que puedan decantar en la clarificación. El aumento de tamaño se logra favoreciendo el contacto entre las partículas o flocs.

La energía entregada puede ser hidráulica o mecánica. A medida que crece el tamaño de los Flocs, la energía entregada debe ser menor, para evitar que éstos se rompan. El tipo y tamaño del floc, depende de la calidad del agua cruda, la dosis de productos químicos y las eficiencias de la coagulación y floculación.

El floculante utilizado es un polielectrólito no iónico, es una poliacrilamida. La poliacrilamida es un polímero formado por una cadena de moléculas. Para que el polielectrólito trabaje correctamente, debe ser disuelto muy lentamente en agua, dejarlo madurar y luego dosificarlo. Este proceso se realiza de manera automática en un aparato que se llama Polypack. La solución a dosificar no debe superar los 2 g/l.

En la siguiente esquema se describe brevemente el circuito para la preparación del Floculante:

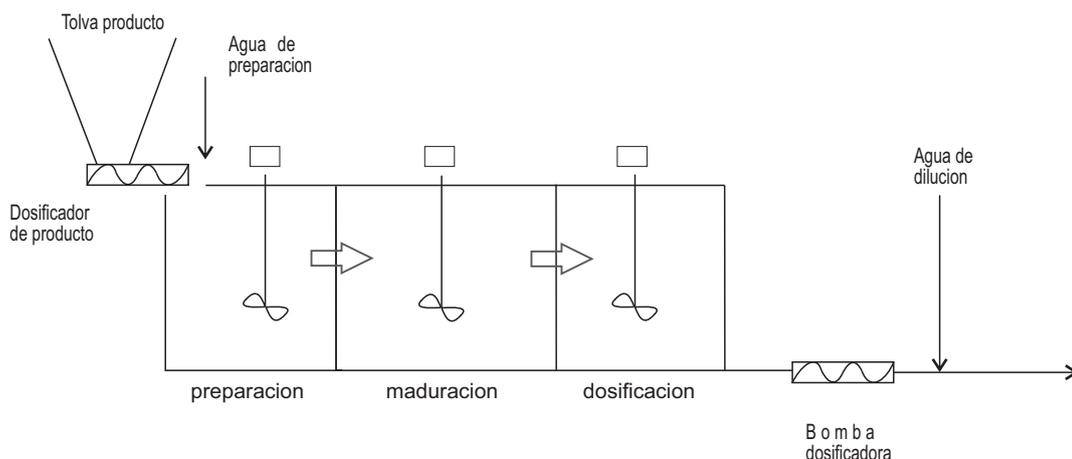


Imagen N° 6: Circuito de preparación del Floculante

3.5.4- Decantación:

El objetivo principal de la decantación es separar las partículas coaguladas en la etapa anterior que se encuentran en suspensión en el agua floculada. Esta etapa sirve para reducir la turbiedad, el color, la materia orgánica y microorganismos (entre los que se encuentran las Algas).

Esto se logra haciendo circular el agua por una unidad que se llama Decantador, que la separa en dos fracciones:

- ✓ El barro que se deposita en la parte inferior.
- ✓ El agua clarificada, con un contenido menor en turbiedad, color, materia orgánica y microorganismos, en la parte superior.

La eficiencia de la decantación depende de:

- ✓ La condición del Floc, el que está directamente asociado a la calidad del agua cruda, y a la eficiencia lograda en los procesos previos de Coagulación y la Floculación.
- ✓ Diseño de los decantadores.
- ✓ Operación.

Existen diferentes tipos de decantadores; decantación Estática, decantación con Lecho de Lodos y decantación con Recirculación de Lodos. La utilizada en la planta Suquia es la **Decantación por Mantos de Lodos**.

La decantación por mantos de lodos son aquellos en los cuales el manto de lodo se encuentra expandido en forma pulsante para asegurar la energía de floculación y mantener el lecho de lodos homogéneo: "Pulsator".

La planta posee en su estructura una cantidad de 5 (cinco) decantadores Dinámicos Pulsator.

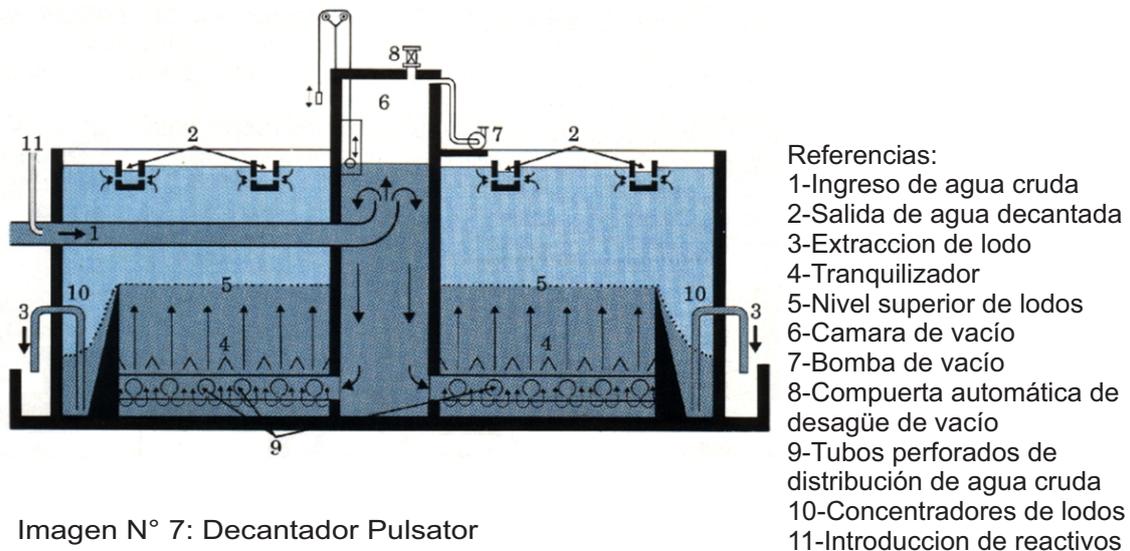


Imagen N° 7: Decantador Pulsator

3.5.5- Filtración:

El objetivo de la filtración es retener las partículas floculadas que no fueron separadas en la decantación.

La filtración se logra haciendo pasar el agua decantada a través de un manto filtrante, el que retiene los coágulos o flóculos. El agua filtrada es recogida en la parte inferior del filtro en aquellos que son de flujo descendente, y en la parte superior en los de flujo ascendente.

En la siguiente imagen se observa un esquema general de un filtro:

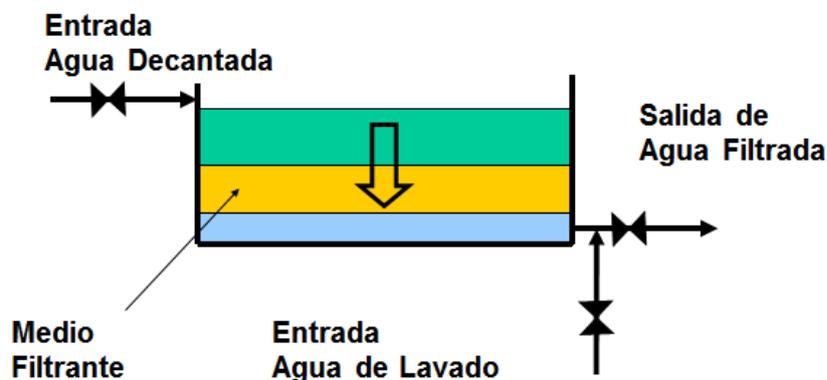


Imagen N° 8: Circuito general del filtro

Existen diferentes tipos de filtros que pueden clasificarse según:

- ✓ Velocidad de filtración
 - Lentos (0.2 – 0.3 m/h)
 - Rápidos (4 – 25 m/h)
- ✓ Material filtrante
 - Homogéneo
 - Combinados
- ✓ Sentido de filtración
 - Ascendente
 - Descendente
- ✓ Fuerza motriz
 - Apresión
 - Agravidad

El control de la filtración puede ser por tasa declinante, por caudal constante o por nivel constante.

Para que se realice una mejor filtración es importante: que los flocs penetren profundamente dentro del lecho filtrante, que no se produzcan cambios bruscos en el caudal de ingreso a la planta y que el lavado se realice a un tiempo oportuno.

La pérdida de carga es la resistencia del manto filtrante granular, al pasaje del agua y aumenta a medida que el manto filtrante se ensucia. Al inicio la pérdida de carga es debido al tamaño, la forma y la porosidad del medio filtrante (denominada etapa de *maduración*); posteriormente es debido al recubrimiento con floc de los granos del material filtrante, lo que disminuye el área libre de paso del flujo.

La carrera de filtración es el tiempo útil de funcionamiento de un filtro, luego del cual debe ser lavado. El agotamiento del filtro se puede producir por dos causas:

- ✓ Haber alcanzado la Máxima Pérdida de Carga disponible (colmatación)
- ✓ Producir Agua Filtrada fuera de Norma (mala calidad)

La eficiencia del lavado depende de:

- ✓ Estado de conservación del filtro
- ✓ Calidad del agua floculada-sedimentada o clarificada, y cantidad de materia en suspensión
- ✓ Medio filtrante, altura y estado de conservación
- ✓ Velocidad de filtración y sus variaciones
- ✓ Sistema de control de la válvula de filtración
- ✓ Calidad del lavado
- ✓ Operación

La planta Suquia posee una total de 24 filtros, de los cuales 4 se encuentran en funcionamiento hace aproximadamente un año (21, 22, 23, 24). En la siguiente imagen se observa la distribución de los filtros en la planta:

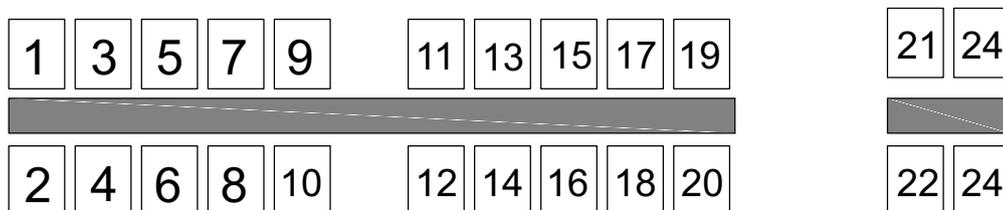


Imagen N° 9: Esquema de ubicación de los filtros de la Planta Suquia

3.5.6- Desinfección:

El objetivo de la desinfección es reducir la cantidad de microorganismos patógenos a concentraciones inocuas para el ser humano, y que el agua sea apta para el consumo humano.

La desinfección se logra dosificando un producto químico que tenga capacidad para oxidar los microorganismos; dicho producto químico puede ser:

- ✓ Cloro
- ✓ Hipoclorito
- ✓ Dióxido de Cloro
- ✓ Ozono
- ✓ Radiación UV

La eficiencia de la desinfección se mide realizando análisis bacteriológicos del agua tratada; y depende de:

- ✓ Dosis de desinfectante utilizado
- ✓ Tiempo de contacto
- ✓ pH
- ✓ Calidad del agua a desinfectar

El Cloro es el producto químico más utilizado, y es el elegido por la Planta Suquia, pues posee un alto poder oxidante y residual. La Desinfección con Cloro es más efectiva a pH ácido, ya que hay mayor concentración de Acido Hipocloroso. La eficacia de la Desinfección depende de la dosis de Cloro y del tiempo de contacto.

El cloro actúa también con la materia orgánica (algas) contenida en el agua, pudiendo formar compuestos llamados Trihalometanos. Cuanto menor es la cantidad de materia orgánica que contiene el agua, menor es la formación de Trihalometanos. Y cuanto más eficiente es la etapa de Clarificación, la cantidad de materia orgánica residual es menor.

El Agua de Consumo siempre debe tener una dosis de Cloro Residual Libre, para asegurar la desinfección y proteger la red de distribución de posibles contaminaciones.

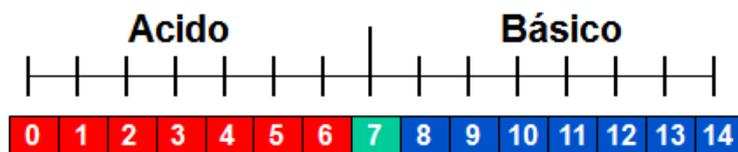
3.5.7-Alcalinización:

El objetivo principal de la alcalinización es corregir el aumento de acidez producido durante la coagulación (un aumento de acidez es una disminución del pH). Esto sirve para lograr un agua de consumo que no sea agresiva para la red de distribución, y que no produzca corrosión ni incrustación.

La alcalinización se logra dosificando un producto químico Alcalinizante que tenga la posibilidad de corregir la acidez. Estos productos pueden ser:

- ✓ Lechada de Cal
- ✓ Agua de Cal
- ✓ Hidróxido de Sodio
- ✓ Bicarbonato de Calcio + Cal
- ✓ CO2 + Cal

La eficiencia se mide realizando mediciones del pH. El pH es una medida de la concentración de ion hidrógeno [H+], en donde $pH = - \log [H^+]$. La escala de variación del pH es:

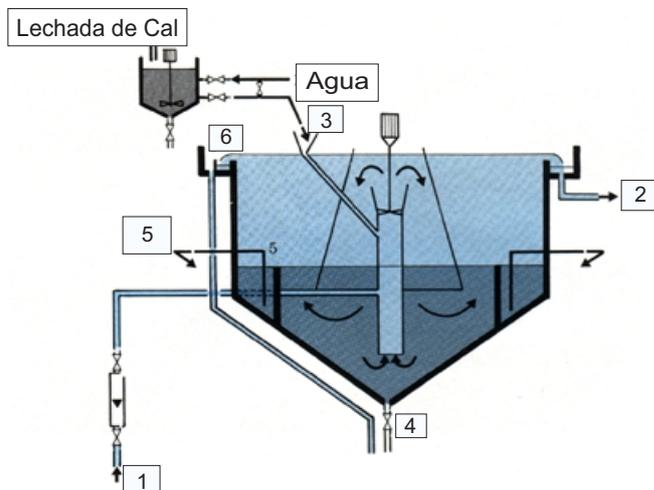


El pH del agua de consumo tiene que ser un valor en el cual no se produzca corrosión, ataque de cañerías de hierro y plomo, o incrustación (sarro).

$$pH = pH_s + 1$$

Siendo pH_s el pH de saturación que es aquel en el cual el carbonato de calcio que contiene el agua se encuentra en equilibrio.

A continuación se muestra una imagen del Saturador de cal que posee la planta, el cual es en donde se realiza la mezcla del agua filtrada con la cal.



- Referencias:
- 1-Entrada de agua
 - 2-Salida de agua de cal
 - 3-Entrada lechada de cal
 - 4-Valvula de vaciado
 - 5-Salida de barro
 - 6-Rebalse

Imagen N° 10: Saturador de Cal

Para finalizar el proceso se realizan autocontroles de calidad, en donde los operadores de Planta realizan diferentes análisis de control del agua en diferentes etapas del proceso, y en el agua de consumo cada dos horas; de manera de asegurar que la calidad de agua producida cumpla con las metas de calidad establecidas en el contrato

Estos controles permiten producir la cantidad de agua para consumo para satisfacer la demanda, al menor costo, respetando todas las Normas de calidad.

3.6- Parámetros de medición de calidad del agua:

✓ **TURBIEDAD:** La turbiedad del agua es una medida de la transparencia del agua, causada por la presencia de materias en suspensión como arcilla, materias orgánicas e inorgánicas finamente divididas, compuestos orgánicos solubles coloreados, plancton y otros microorganismos. La medición en el rango de 0 a 4000 UNT se hace por comparación de la intensidad de la luz dispersada por una sustancia de referencia, en las mismas condiciones

✓ **COLOR:** El color del agua puede estar condicionado por la presencia de iones metálicos naturales (hierro, manganeso), de humus y turbas, de plancton, de restos vegetales y de residuos industriales. Tal coloración se elimina para adaptar un agua a usos generales e industriales. La medición se realiza por comparación del color de la muestra contra patrones.

✓ **ALCALINIDAD:** Las condiciones normales de alcalinidad de las aguas naturales están asociadas con el dióxido de carbono y los bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos. Para su determinación se efectúa una titulación con ácido sulfúrico 0,02 N, utilizando como indicador heliantina o verde de bromocresol + rojo de metilo. Los resultados se expresan en mg/l de carbonato de calcio.

✓ **pH:** Da una idea de la acidez o basicidad del agua. La determinación se realiza por medida potenciométrica usando un electrodo de vidrio y un electrodo de referencia más un amplificador electrónico.

✓ **AMONIO:** Se encuentra en muchas fuentes de agua, tanto en superficie como subterráneas, y se debe a la actividad microbiológica. La determinación se hace colorimétricamente, el color desarrollado es proporcional a la concentración de amonio presente.

✓ **OXIDABILIDAD:** Es una medida del contenido de materia orgánica. En la determinación se hace reaccionar en caliente permanganato de potasio con las sustancias oxidables de la muestra. El color desarrollado es proporcional al contenido de materia orgánica. El valor se determina utilizando un espectrofotómetro.

✓ **CONDUCTIVIDAD:** Es una expresión numérica de la capacidad de una solución acuosa de transportar corriente eléctrica. La conductividad depende de la presencia de iones, su concentración total y de la temperatura. La medición se realiza utilizando un conductímetro.

✓ **ALUMINIO:** El aluminio presente en la muestra reacciona, a pH 6, con el colorante eriocromo cianina, para dar un complejo rosado cuya absorbancia es proporcional a la concentración de aluminio presente. El Aluminio Total: es el aluminio soluble más el particulado, el cual queda retenido en la membrana de filtración.

✓ **COLOR RESIDUAL LIBRE:** Se determina por titulación con sal de Mohr, a una muestra de agua a la cual se le agregó DPD.

4- Teoría de Filtración

4.1- Objetivo:

El objetivo básico de la filtración es separar las partículas y microorganismos objetables, que no han quedado retenidos en los procesos de coagulación y sedimentación. En consecuencia el trabajo que los filtros desempeñan, depende directamente de la mayor o menor eficiencia de los procesos preparatorios.

Con el paso del agua a través de un lecho de arena se produce:

- ✓ Reducción de materiales en suspensión y sustancias coloidales.
- ✓ Reducción de las bacterias presentes.
- ✓ Alteración de las características del agua, inclusive de sus características químicas.

Los fenómenos que se producen durante la filtración son:

- ✓ La acción mecánica de filtrar.
- ✓ La sedimentación de partículas sobre granos de arena.
- ✓ La floculación de partículas que estaban en formación, debido al aumento de la posibilidad de contacto entre ellas.
- ✓ La formación de la película gelatinosa en la arena, producida por microorganismos que se producen allí (filtro lento).

4.2- Proceso de filtración:

El agua, ya sea sedimentada o no, que entra a un filtro, contiene una variedad muy grande de partículas en suspensión. El floc grande, cuyo volumen es mayor que el de los poros del medio granular, será removido por simple cernido en los intersticios del lecho; en cambio, el material cuyo orden de magnitud es varias veces menor que el de los poros (dimensiones de hasta 100 veces menores que ellos) entran libremente en el material granular y tienen que atravesar una distancia relativamente grande antes de poderse adherir a los granos que forman dichos poros.

Entonces el proceso de filtración se puede considerar que ocurre en 2 etapas:

1- La de transporte de las partículas dentro de los poros:

- a) **CERNIDO:** Es evidente que cuando la partícula es de tamaño mayor que los poros del lecho filtrante, puede quedar atrapado en los intersticios. El floc grande puede tener de 0,5 a 2 mm de diámetro. El cernido actúa solo en las capas más superficiales del lecho y con partículas relativamente fuertes capaces de resistir los esfuerzos cortantes producidos por el flujo.
- b) **SEDIMENTACION:** El medio filtrante ofrece una enorme área, donde los sólidos suspendidos pueden quedar depositados por sedimentación. La sedimentación solo puede producirse, con material suspendido relativamente grande y denso cuya

velocidad de asentamiento sea alta, y en zonas del lecho donde la carga hidráulica sea baja.

c) **INTERCEPCION:** Este proceso progresa en una serie de pasos: Inicialmente el floc empieza a pegarse a la cara superior del grano, y a medida que mayor cantidad de materia se le adhiere va siendo recubierta con una película, inclusive hasta la cara inferior. Esta película va creciendo con el tiempo, con lo que la velocidad del flujo intersticial aumenta al disminuirse el tamaño de las constricciones, de modo que un menor número de partículas puede adherirse a los granos superiores y tiene que penetrar hasta las capas inferiores. Luego al continuar la filtración, aparecen segmentos que cuelgan de los granos, los cuales eventualmente se rompen y son retenidos más abajo por otros granos menos recubiertos. Finalmente el proceso de arrastre de la película se hace cada vez mayor a medida que su espesor crece, con lo que la colmatación del medio filtrante progresa en profundidad. Por lo que las partículas débiles son arrastradas y reemplazadas por otras más fuertes.

d) **DIFUSIÓN:** Existe una tendencia de las partículas pequeñas a difundirse desde las áreas de mayor concentración a las áreas de menor concentración. Experimentalmente se ha demostrado que las suspensiones de arcilla presentan fenómenos de difusión. Esta es la razón por la cual se puede encontrar sólidos adheridos a los granos del medio, en puntos, donde la velocidad del flujo es prácticamente cero. La eficiencia del filtro debida a la difusión es directamente proporcional a la temperatura e inversamente proporcional al diámetro de la partícula (d_p) y del grano (D).

e) **IMPACTO INERCIAL:** Cuando la velocidad del flujo es alta y la partícula es grande, debe tenerse en cuenta los efectos de la inercia, los cuales hacen que aquella seguir una trayectoria distinta a la de las líneas de flujo, si adquiere suficiente cantidad de movimiento para eso. Entonces al pasar una suspensión alrededor de un obstáculo, mientras las líneas de flujo se curvan, las partículas pueden continuar con su trayectoria original, impulsadas por la fuerza de inercia, y chocar con el grano del filtro quedando adheridas a él.

2- La de adherencia a los granos del medio:

a) **FUERZAS DE VAN der WALLS:** Estas fuerzas son las responsables de la adhesión de las partículas a los granos del filtro; actúan a muy corta distancia y d_p es mucho menos que D_c . Entonces:

$$F_a = K \times d_p / 12 \times r^2$$

La constante de Van der Walls incrementa con la densidad de las partículas, de manera que el floc más denso se adhiere con más fuerza al medio filtrante. Las fuerzas de Van der Walls son independientes del pH y de las características de las fases acuosas.

b) **FUERZAS ELECTROESTATICAS:** Es la combinación de las fuerzas coulombicas con las de Van der Walls las que determinan, la adsorción entre partículas. Consideramos este mecanismo como el responsable de la adhesión del material suspendido al medio filtrante. Esto ayuda a explicar que por qué la mayor o menor dosificación de coagulante influencia tan estrechamente el comportamiento de los filtros.

c) PUENTE QUÍMICO: El uso de ayudantes de filtración o polielectrólitos inyectados en el afluente al filtro, puede por eso ser de gran utilidad para aumentar la adhesión de la materia suspendida al medio filtrante. Las partículas con sus segmentos poliméricos adheridos, al atravesar las constricciones del medio filtrante, se alzan con los segmentos sueltos adsorbidos por los granos o por los de partículas ya adheridas al lecho filtrante y quedan en esta forma retenida.

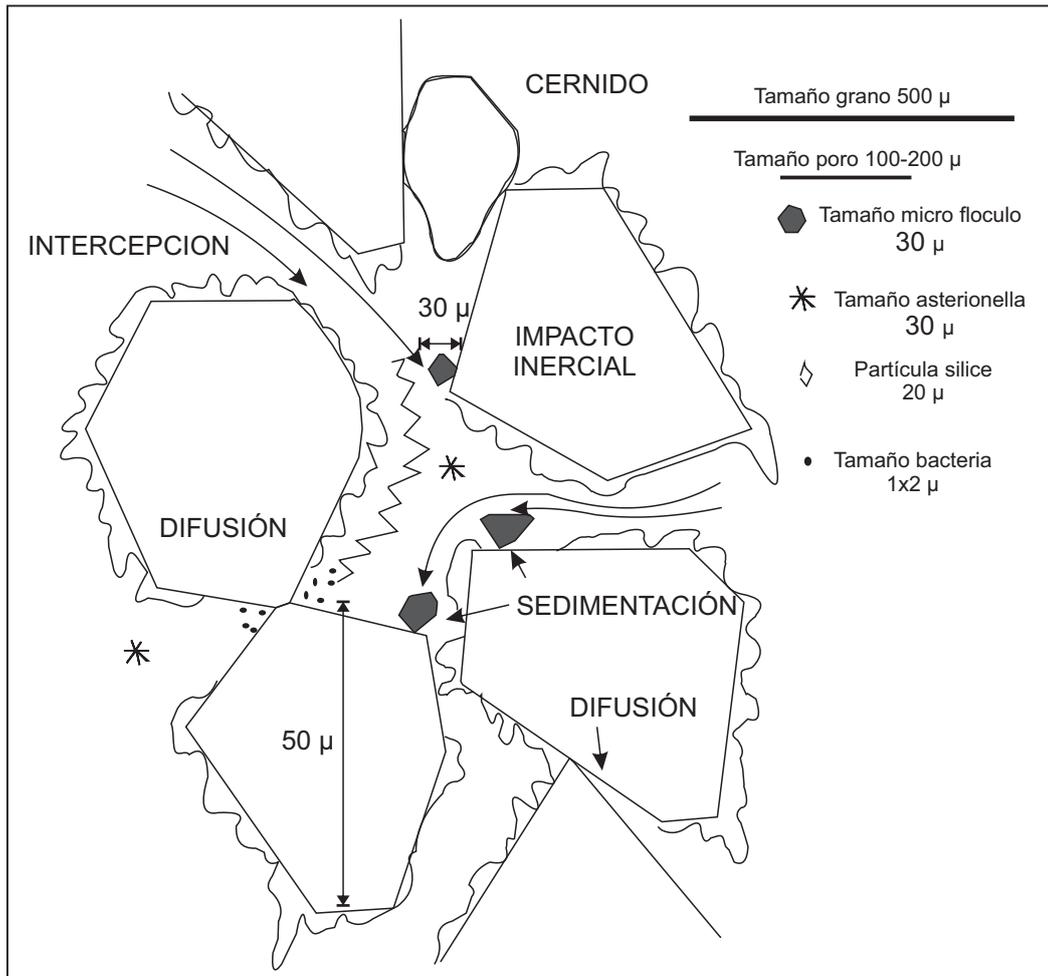


Imagen N° 11: Diferentes mecanismos que producen transporte de las partículas hasta los granos de un medio filtrante.

5- Tipos de Filtros

5.1- Clasificación de filtros

Se cuenta con una gran variedad en los procesos de filtración:

- ✓ Según el tipo de funcionamiento
 - Continuos
 - Semicontinuos
- ✓ Sentido de flujo durante la filtración
 - De flujo Ascendente
 - De flujo Descendente
- ✓ Tipo de medio filtrante y configuración del lecho
 - De una única capa
 - De doble capa
 - Multicapa
- ✓ Control de flujo
 - Acaudal constante
 - Acaudal variable decreciente

Asu vez, existe una amplia combinación de las distintas características nombradas anteriormente de los filtros.

- ✓ I Filtros con flujo descendente:
 - 1- Rápidos con lecho de un solo material
 - a) De arena sola
 - b) De antracita sola
 - 2- Rápidos con lecho múltiple
 - a) De antracita y arena
 - b) De antracita, arena y granate
 - 3- Lentos con lecho de un solo material
 - a) De arena convencionales
 - b) De arena dinámicos

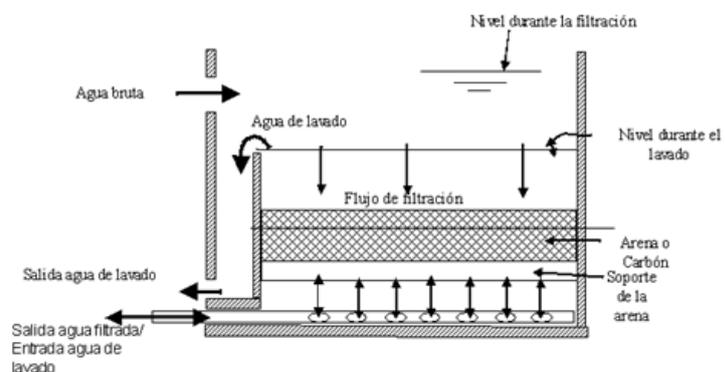


Imagen N° 12: Filtro Flujo Descendente.

✓ II Filtros con flujo ascendente:

- 1- De alta rata o carga superficial (rápidos)
- 2- De baja rata o carga superficial (lentos)

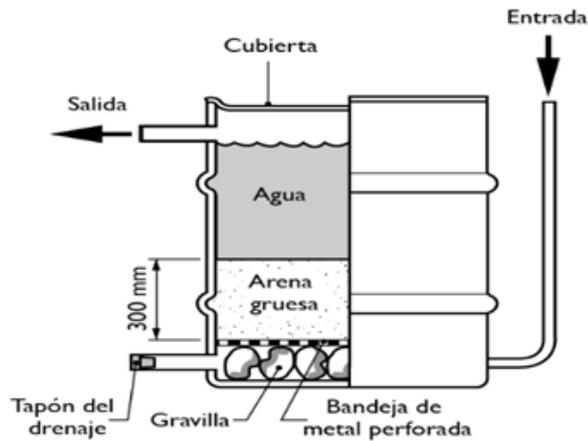


Imagen N° 13: Filtro Flujo Ascendente.

✓ III De flujo mixto (parte ascendente y parte descendente)

✓ IV Filtros de Diatomáceas

Los filtros más comunes en plantas de tratamientos municipales son los de flujo descendente, a saber:

- 1- Filtros rápidos de arena sola o antracita
- 2- Filtros de lecho mixto: de arena y antracita o arena, antracita y granete.
- 3- Filtros lentos de arena sola.

A continuación se detallara un cuadro comparativo con los distintos filtros mencionados

Características	FILTRO RÁPIDO CON LECHO MIXTO (Arena y atrancita)				FILTRO RÁPIDO CON LECHO DE ARENA			FILTRO LENTO CON LECHO DE ARENA		
	Carga superficial de filtración	m ³ /m ² / día	235	350	590	87,5	117,5	157	7	9,33
lt/seg/ m ²		2,75	4,05	5,83	1,01	1,36	2,03	0,081	0,108	0,162
Vel. de filtración	cm/seg	0,272	0,405	0,683	0,101	0,136	0,203	0,203	0,108	0,0162
Profundidad del lecho filtrante	30 - 45 cm de grava				30 - 45 cm de grava			30 cm de grava		
	45 - 60 cm de antracita				60 - 75 cm de antracita			90 - 110 cm de antracita		
	15 - 30 cm de arena									
Drenaje	Falsos fondos o similares				Tuberías metálicas perforadas o placas porosas, falsos fondos, etc			Tuberías perforadas de gas o cemento		
Lavado	Invirtiendo el flujo con agua proveniente de un tanque elevado o una bomba. Vel de lavado: 0,60 - 1,00 m/min o m ³ /m ² /min				Invirtiendo el flujo a presión con agua proveniente de un tanque de lavado o una bomba. Vel de lavado 0,80 - 1,2 m/min o m ³ /m ² /min			Raspado la superficie de la arena		
Perdida de carga	De 20 cm hasta 270 cm máximo				De 30 cm hasta 270 cm máximo			De 16 cm hasta 120 cm máximo		
Tiempo entre limpiezas	12 - 48 hs				24 - 48 - 72 hs			20 - 30 - 60 días		
Penetración del floc	Profunda				5 cm superiores (mayor cantidad)			De 16 cm hasta 120 cm máximo		
Cant. de agua usada en lavado	1 - 3 % del agua filtrada				1 - 6 % del agua filtrada			0,2 - 0,6 % del agua filtrada		
Tratamiento previo del agua	Coagulación, floculación y sedimentación				Coagulación, floculación y sedimentación			Ninguno o aireación (rara vez floculación y sedimentación)		
Costo de construcción	Mas bajo que el de los filtros rápidos de arena				Mas bajo que el de los filtros lentos			Alto		
Costo de operación	Igual al de los filtros rápidos de arena				Mas alto que el de los filtros lentos			Bajo		
Area ocupada por los filtros	1/2 a 1/5 de la de los filtros rápidos de arena							Mas grande que la de los filtros rápidos de arena (aprox 12 veces mayor)		

Fuente: Degremont - “Manual Técnico del Agua”

6- Filtro de la Planta Potabilizadora Suquia

El filtro utilizado en la Planta Potabilizadora del Suquia es la denominada “**Filtro Rápido de gravedad, con lecho filtrante de un solo material**”.

Los objetivos básicos de calidad del agua filtrada se basan en: la turbiedad, el coagulante (Al, Fe) y las materias orgánicas, entre otros, que se encuentran al filtrar el agua. En este informe nos basaremos exclusivamente en la **turbiedad** para calificar el agua filtrada.

6.1- Filtros AQUAZUR de gran altura de agua, tipo V”

Específicamente el nombre del filtro que se encuentra en la planta Suquia es: “Filtros AQUAZUR de gran altura de agua, tipo V”

En general los filtros rápidos abiertos de AQUAZUR tienen las características de un lecho filtrante de granulometría homogénea, aproximadamente de 1 mm. El lavado se realiza por retorno simultáneo de agua y aire, sin expansión del lecho.

Y particularmente el filtro AQUAZUR de gran altura de agua, tipo V, tiene las siguientes características:

- ✓ Talla efectiva de la arena = 0,95 a 1,2 mm
- ✓ Velocidad de filtración = 4 a 15 m³/h
- ✓ Caudal de lavado = 13 a 15 m³/h.m²
- ✓ Caudal de aire de lavado = 50 a 60 m³/h

- ✓ 1° fase de lavado = Evacuación del agua hasta cierto nivel.



Se observa que dicho nivel es al ras del máximo nivel del canal de desagüe.

- ✓ 2° fase de lavado = Lavado con agua a bajo caudal y aire durante 8 a 9 min.



Aquí se observa la zona de lavado superficial, por donde ingresa el agua de lavado.

- ✓ 3° fase de lavado= Lavado con agua a alto caudal durante 6 a 8 min.



Se observa como disminuye la turbiedad del agua finalizando la tercera etapa de lavado.

6.2- Partes del filtro:

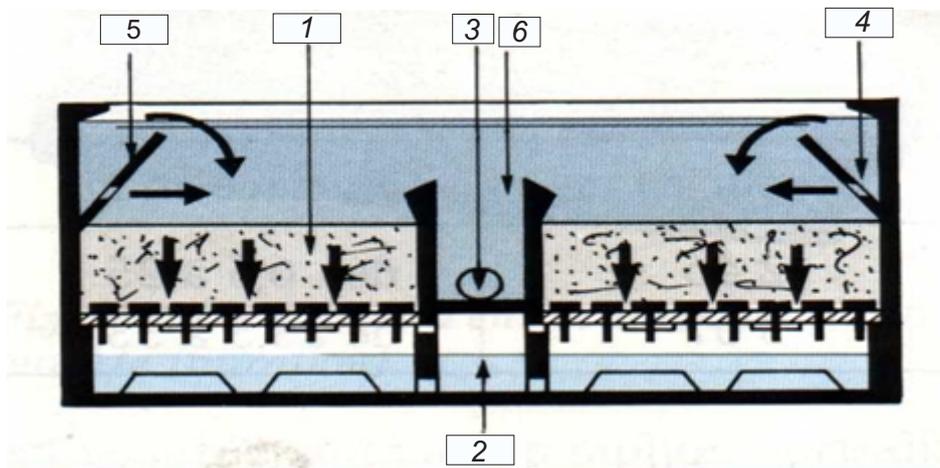


Imagen N° 14: Partes del Filtro AQUAZUR V

Referencias:

- 1- Arena
- 2- Canal de agua filtrada
- 3- Válvula de salida de agua de lavado
- 4- Lavado Superficial
- 5- Vertedero en V
- 6- Vertedero agua de lavado

✓ Caja:

Consta de un tanque rectangular de concreto de 10 m. de largo, 8 m. de ancho y 3,5 m. a 5 m. de profundidad total, en el cual se coloca un lecho de arena sobre un sistema adecuado de drenaje. El flujo pasa de la parte superior del tanque cuya profundidad se suele hacer de 0,50 m. a 2 m., a los drenes del fondo atravesando el medio filtrante.



Foto N° 15: Caja del Filtro

✓ Medio Filtrante:

El medio filtrante que se utiliza es la arena, la cual tiene un diámetro de 0,9 a 1 mm. De 1 metro de espesor aproximadamente, la que debe estar limpia, sin barro ni materia orgánica. Se considera que la longitud de la carrera de filtración es:

$$t = k \times E^n$$

Siendo: t= periodo de servicio o carrera del filtro; E: tamaño efectivo; n: exponente=2; k: constante que depende de las características del floc.



Foto N° 16: Manto Filtrante

✓ Válvula de salida del agua de lavado:

Es la válvula que se abre durante la etapa de lavado y dirige el agua que está siendo removida por una cañería de desagüe hacia el tratamiento de lodos. Posee un diámetro de 70 cm.



Foto N° 17: Salida del agua de lavado

✓ Válvula de entrada del agua decantada:

Es una válvula que se encuentra enfrentada a la válvula de salida del agua de lavado, y es por donde entra el agua que proviene de los decantadores, para ser filtrada. Posee un diámetro de 120 cm.

En las imágenes siguientes la válvula se encuentra abierta.



Foto N° 18: Entrada del agua al filtro

✓ Canal del agua de lavado:

Es un canal rectangular, con un ancho de 70 cm y largo de 10 m. (igual al largo de la caja) y altura de 88 cm. También posee una pendiente decreciente hacia la válvula de salida. Y es el lugar por donde se dirige el agua de lavado hasta la válvula.



Foto N° 19: Canal de desagüe del agua de

✓ Vertedero de agua de lavado:

Es un vertedero en forma de V de 7,1 cm de ancho y 0,65 cm de altura; por donde circula agua del tanque durante la etapa de lavado del filtro. Posee orificios de 26 mm de diámetro en la parte inferior del vertedero, de manera que expulse el agua por esos orificios y por la parte superior para realizar el lavado superficial.



Foto N° 20: Vertedero de agua de lavado

✓ Sistema de drenaje:

El objeto de los drenes que se colocan en el fondo del filtro es doble:

- a) Recolectar y extraer el agua filtrada.
- b) Distribuir uniformemente el agua de lavado en el lecho filtrante.

Cuando los drenes están mal diseñados y no distribuyen uniformemente el agua de lavado, desestratifican la arena causando pérdidas del medio filtrante y deficiente limpieza de los granos.

Los sistemas de drenajes podríamos clasificarlos en 3 tipos:

- 1- Tuberías perforadas.
- 2- Falsos fondos.
- 3- Placas porosas.

La planta posee como sistema de drenaje “Falsos fondos” constituidos por losetas perforadas; la altura total del falso fondo es de aproximadamente 1 metro.

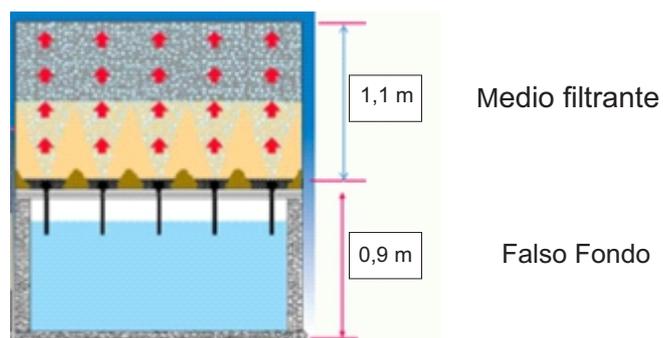


Imagen N° 21: Corte de un filtro

✓ Control de nivel:

El flujo dentro del tanque es regulado según el nivel de agua, mediante sensores de presión hidrostática. La presión es controlada en las válvulas de entrada y salida, y su regulación determina el caudal filtrado. Las opciones de los sensores incluyen transmisores de presión diferencial y relativa. Dichos sensores se ubican enfrentados a la zona de la válvula de descarga del agua decantada.

✓ Tubería de lavado:

Es la tubería por donde ingresa el agua de lavado, está conectado por una parte al tanque elevado (el cual provee el agua de lavado) y por otro a la tubería de filtrado. Posee el mismo diámetro que la tubería de agua filtrada.

✓ Tubería de aire de lavado:

Es la tubería que provee el aire al medio filtrante durante la etapa de lavado. Posee un diámetro de 25 cm

6.3- Funcionamiento del filtro:

El principio de funcionamiento de dicho filtro es a “**nivel constante**”, esto significa que a medida que el nivel del agua aumenta hasta una altura prefijada próximo al desborde (105 cm.), la válvula de filtración aumenta su apertura y así el nivel de agua vuelve a su altura anterior, de esta manera el nivel nunca sobrepasara dicha altura.

Todo este proceso se realiza de forma automática mediante un sistema de programación “SKADA TOPKAPI”; el operador solo debe cargar las variables de funcionamiento y luego verificar el correcto funcionamiento.

Al inicio de la filtración, al reacomodarse los granos, el agua arrastra parte del material en suspensión. Los materiales en suspensión en el agua, que son más grandes que los espacios intergranulares de la arena, quedan retenidos en la superficie filtrante. Los que son más pequeños se van adhiriendo a la superficie interna de los granos y, de esa manera, disminuyen los espacios por donde pasa el agua. Así, a medida a medida que el filtro se ensucia hay una mayor resistencia al paso del agua.

Luego el aumento de resistencia al paso del agua por la arena corresponde a una reducción del caudal del filtro o un aumento de velocidad de filtración. Cuando el filtro está limpio es posible filtrar un volumen de agua mayor, a medida que el filtro se obstruye por la suciedad (lo que se denomina colmatación), la tasa disminuye.

El fenómeno que se produce con la obstrucción del filtro por la suciedad retenida se llama: pérdida de carga. En los filtros limpios recién lavados la diferencia de nivel se ubica alrededor de 0,50 m. (la diferencia de nivel es la pérdida de carga). Cuando alcanza una pérdida de carga de 1,80 m. a 2,50 m. lo que indica una apertura de la válvula del 100% entonces el filtro se debe lavar. Esta diferencia de nivel es medida por un sensor, ubicado en la parte superior de la caja del filtro, el cual indica la presión hidrostática.

6.4- Fases de un ciclo de Filtración:

Las principales fases de un ciclo de filtración que afectan la calidad del agua se pueden dividir en tres:

1° Fase: Maduración-

Periodo después del lavado que dura entre 10 y 40 minutos, incluso puede llegar hasta 2 o 3 horas, (corresponde a un volumen pasado de agua filtrada equivalente a 1 o 2 volúmenes del filtro); durante el cual los valores de turbiedad y de recuento de partículas son elevados (paso por un máximo: entre 0,5 y 1 NTU, entre 1.000 y 5.000 partículas > 1micron/ml) para volver luego hacia los valores de equilibrio (<0,2NTU y <500 partículas > 1 micrón/ml) los mismos que son equivalentes al régimen estabilizado de filtración.

Este periodo de filtración es la fase de producción "de riesgo máximo" en lo referente al paso de microorganismos, por lo que debe ser controlado de la mejor manera posible (reducción de los picos de turbiedad y disminución de la duración de esta fase).

Para lograr estos objetivos es importante:

- ✓ Asegurar la dosificación óptima de los reactivos.
- ✓ Controlar los caudales de salida en producción (después de lavado, velocidad creciente de filtración).
- ✓ Evacuar las aguas producidas durante la puesta en marcha de los filtros y reciclarlos en cabeza de planta. Se recomienda descartar al desagüe las primeras aguas filtradas superiores a 0,5 NTU.
- ✓ Efectuar una coagulación sobre filtro en el momento de la puesta en marcha.

2° Fase: Estacionario-

Tras la maduración, el filtro produce un agua de calidad constante vinculada al tratamiento químico aguas arriba. En lo referente a la velocidad de filtración, es importante: ajustarse a los datos del fabricante, controlar la pérdida de carga, la turbiedad y eventualmente el recuento de partículas para provocar el lavado antes de la perforación.

3° Fase: Perforación o rotura-

El filtro se halla saturado y no puede retener más el conjunto de las partículas que llegan sobre el medio filtrante. La rotura es detectable por diferencia (progresiva e irreversible) de las señales de turbiedad y recuento de partículas, con relación a las líneas básicas de estos analizadores. El recuento de partículas es más sensible y permite anticipar la señal de turbiedad con varias horas. En todos los casos, el filtro debe lavarse antes de que esta fase haya sido alcanzada. En efecto, esta fase puede ser asociada al paso de microorganismos en el agua filtrada, cosa que debe evitarse.

6.5- Procedimiento del muestreo de turbiedad bajo filtro:

Dicho procedimiento se realiza en la sala de filtros, a continuación se observan imágenes de la sala:



Imagen N° 22: Identificación del filtro



Imagen N° 23: Bajo filtro viejos

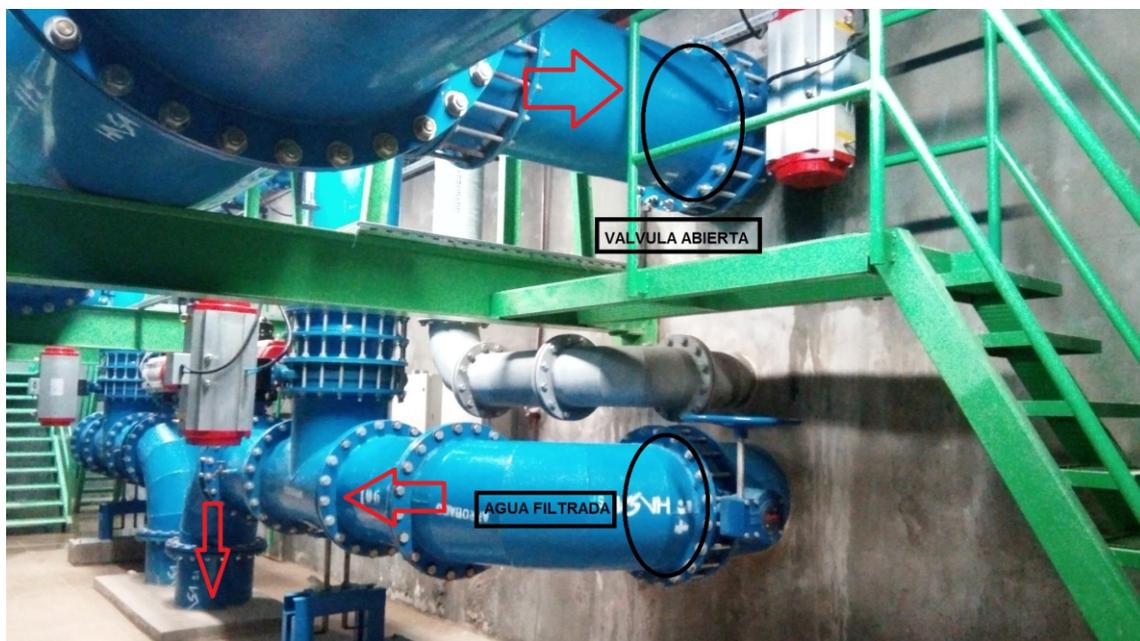
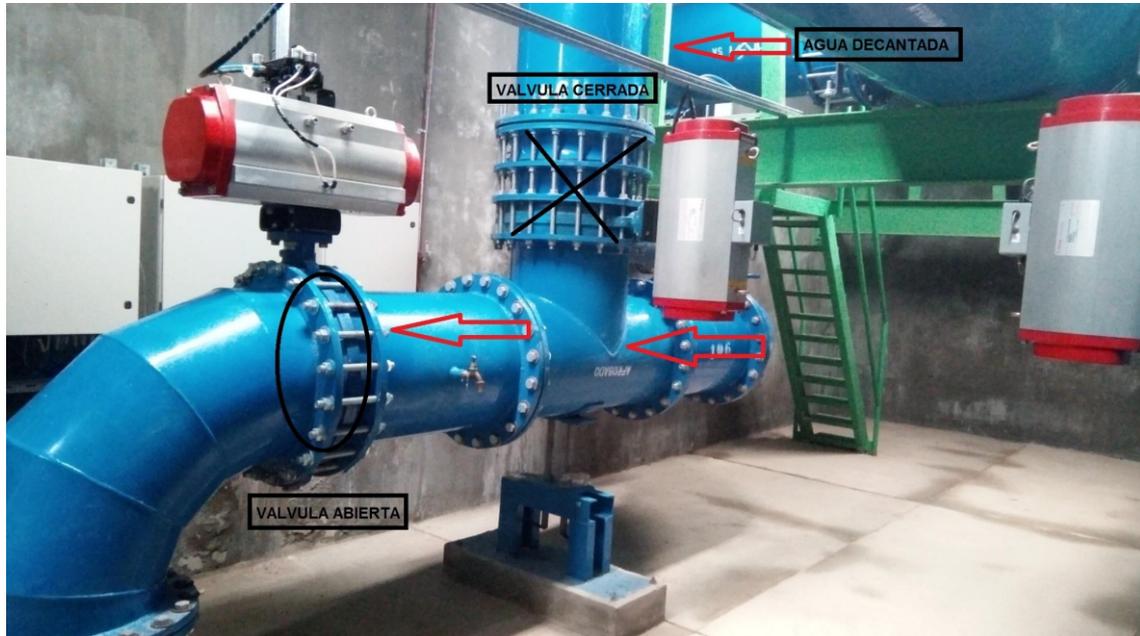
En la Imagen N° 22 se distingue como están identificados los filtros en la sala; y en la imagen N° 23 se observa la disposición de las cañerías, válvulas y equipamientos necesarios en los filtros viejos.



Imagen N° 24: Bajo filtros Nuevos

Y en las siguientes imágenes se observa la sala bajo filtros de los nuevos, en donde se encuentran los filtros 21, 22, 23 y 24. Y los equipos cuentan con una avanzada tecnología.

El mecanismo durante la filtración es el siguiente:



A continuación se describirá los pasos para llevar a cabo un muestreo de turbiedad y colmatación del manto durante la carrera de un filtro:

1- Una vez terminado el lavado y abierta la válvula de descarga (agua que proviene de los decantadores), se empiezan a tomar las muestras del agua filtrada.



2- La primera muestra se toma a los 30 seg; y en cada muestra se registra el porcentaje de apertura de la válvula.



El equipo que se observa en la imagen es un posicionador de la válvula de filtración, el cual indica la apertura que tiene dicha válvula en cada instante.

3- Luego se toma muestra cada 30 segundos hasta llegar a los 5 min.

4- A partir de allí se toma cada 5 min hasta los 30 min.

5- Finalmente tomo muestra a la hora, y a partir de allí se toma a cada hora.

Los envases de las muestras se identifican como se muestra en la siguiente imagen, colocando número de envase y hora en la cual fue tomada la muestra.



6- Una vez obtenidas todas las muestras, se procede a calcular la turbiedad de cada una de ellas.

De esa manera se obtiene una curva de doble eje: de turbiedad y % de apertura de la válvula.

Aclaración: el muestreo debe terminar cuando termina la carrera del filtro, esto puede ocurrir por colmatación del filtro (cuando la válvula llega al 100% de su apertura) o cuando la calidad del agua (turbiedad) supera la esperada.

6.6- Ensayos de Turbiedad y colmatación Bajo filtro:

Para una simplificación del estudio se ha tomado un filtro ejemplar por cuadrante, para ser estudiado. Considerando:

Primer cuadrante: Filtros 1, **3***, 5, 7, 9

Segundo cuadrante: Filtros **2***, 4, 6, 8, 10

Tercer cuadrante: Filtros 11, 13, 15, 17, **19***

Cuarto cuadrante: Filtros **12***, 14, 16, 18, 20

Quinto cuadrante: Filtros 21, **22***, 23, 24

(*) filtros los seleccionados para el estudio

Para evaluar la eficiencia de un filtro por la medición específica de la turbiedad, el muestreo debe hacerse durante la fase estacionaria del ciclo de filtración, es decir, después de al menos 5 o 10 horas de funcionamiento. En este estudio se realizará medición durante toda la carrera del filtro.

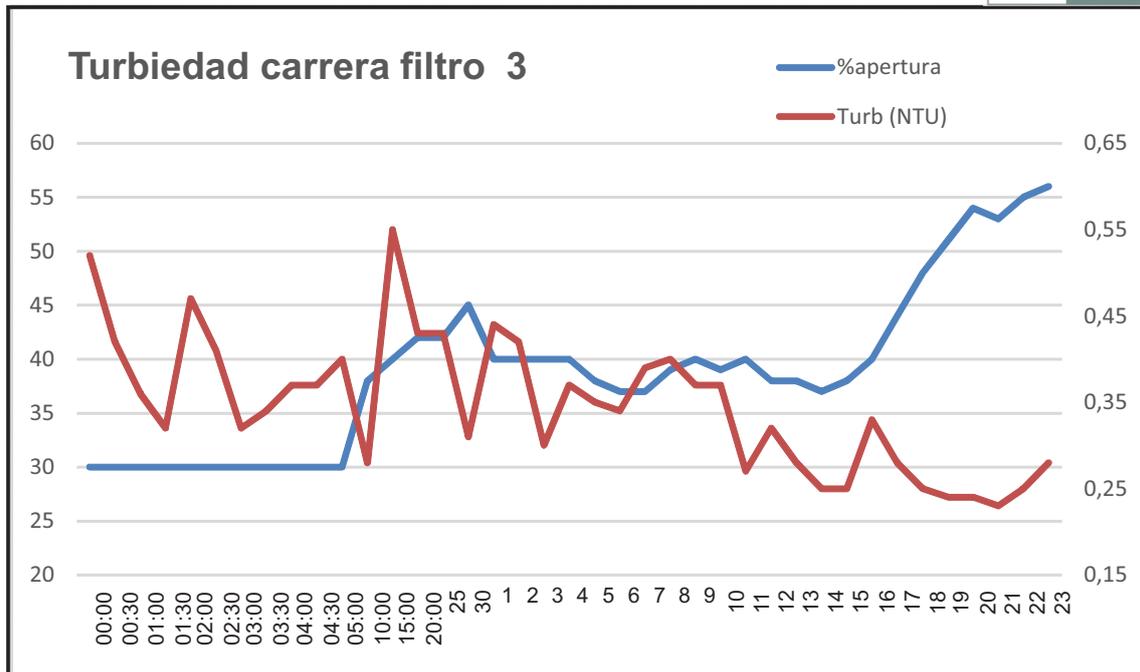
Objetivo: Como medidas internas se busca que el 95% de los valores de turbiedad medidos deben ser menores a 0,2 NTU, y el 100% de los valores menores a 0,5 NTU. Sin embargo la meta contractual de agua de "salida" es <1.5 NTU.

a) Filtro número 3:

Fecha: 21/05/2018	
Carrera: 24 horas	
	Turb. (NTU)
Agua cruda	5,4
Agua decantada	0,978
Agua filtrada	0,22

21-may	Tiempo (min)	%apertura de la válvula	Turb (NTU)
	00:00	30	0,52
	00:30	30	0,42
	01:00	30	0,36
	01:30	30	0,32
	02:00	30	0,47
	02:30	30	0,41
	03:00	30	0,32
	03:30	30	0,34
	04:00	30	0,37
	04:30	30	0,37
	05:00	30	0,4
	10:00	38	0,28
	15:00	40	0,55
	20:00	42	0,43
	25	42	0,43
	30	45	0,31
	1	40	0,44
	2	40	0,42
	3	40	0,3
	4	40	0,37
	5	38	0,35
	6	37	0,34
	7	37	0,39
	8	39	0,4
	9	40	0,37
	10	39	0,37
	11	40	0,27
	12	38	0,32
	13	38	0,28
	14	37	0,25

22-may	Tiempo (horas)	%apertura de la válvula	Turb (NTU)
	15	38	0,25
	16	40	0,33
	17	44	0,28
	18	48	0,25
	19	51	0,24
	20	54	0,24
	21	53	0,23
	22	55	0,25
	23	56	0,28



Observaciones de los datos obtenidos:

La carrera de dicho filtro duro 24 horas y se observa que durante la carrera no hubo etapa de maduración, ya que desde la primera medición el filtro entrego agua de buena calidad y con una turbiedad cercana a la deseada. Se puede observar que prácticamente el 100% de las mediciones son menores a 0,5 NTU y mayores a 0,2 NTU. El filtro posee un excelente funcionamiento.

También se ha observado que el filtro funciona continuamente con un % de apertura de la válvula nunca mayor a 56%.

b) Filtro número 2:

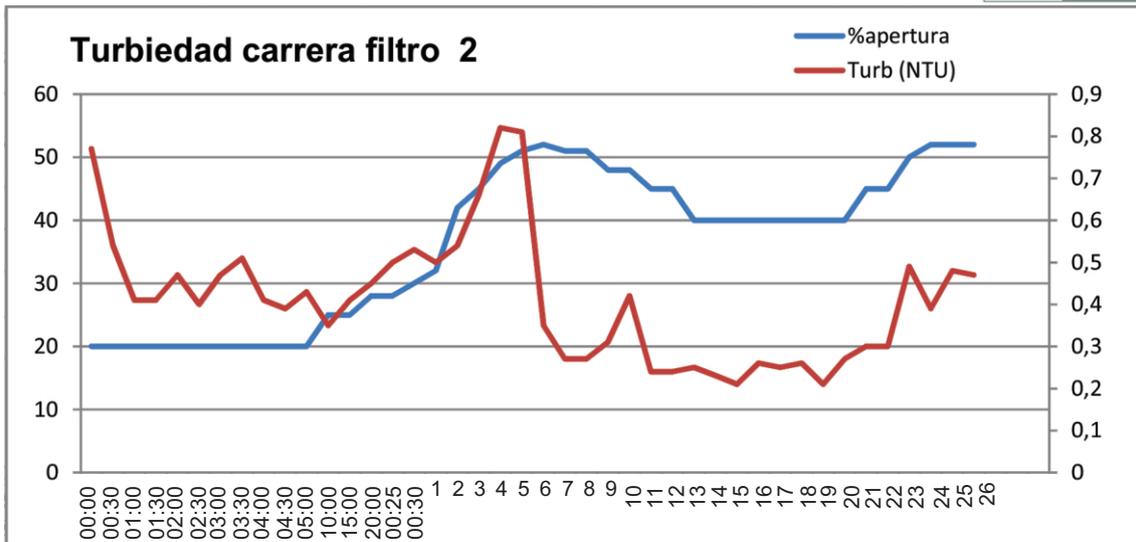
Fecha: 7/05/2018	
Carrera: 27 horas	
	Turb. (NTU)
Agua cruda	3,6
Agua decantada	1,019
Agua filtrada	0,30

07-may

Tiempo (min)	%apertura de la válvula	Turb (NTU)
0:00	20	0,77
0:30	20	0,54
1:00	20	0,41
1:30	20	0,41
2:00	20	0,47
2:30	20	0,4
3:00	20	0,47
3:30	20	0,51
4:00	20	0,41
4:30	20	0,39
5:00	20	0,43
10:00	25	0,35
15:00	25	0,41
20:00	28	0,45
25	28	0,5
30	30	0,53
1	32	0,5
2	42	0,54
3	45	0,66
4	49	0,82
5	51	0,81
6	52	0,35
7	51	0,27
8	51	0,27
9	48	0,31
10	48	0,42
11	45	0,24
12	45	0,24
13	40	0,25
14	40	0,23

08-may

Tiempo (min)	%apertura de la válvula	Turb (NTU)
15	40	0,21
16	40	0,26
17	40	0,25
18	40	0,26
19	40	0,21
20	40	0,27
21	45	0,3
22	45	0,3
23	50	0,49
24	52	0,39
25	52	0,48
26	52	0,47



Observaciones de los datos obtenidos:

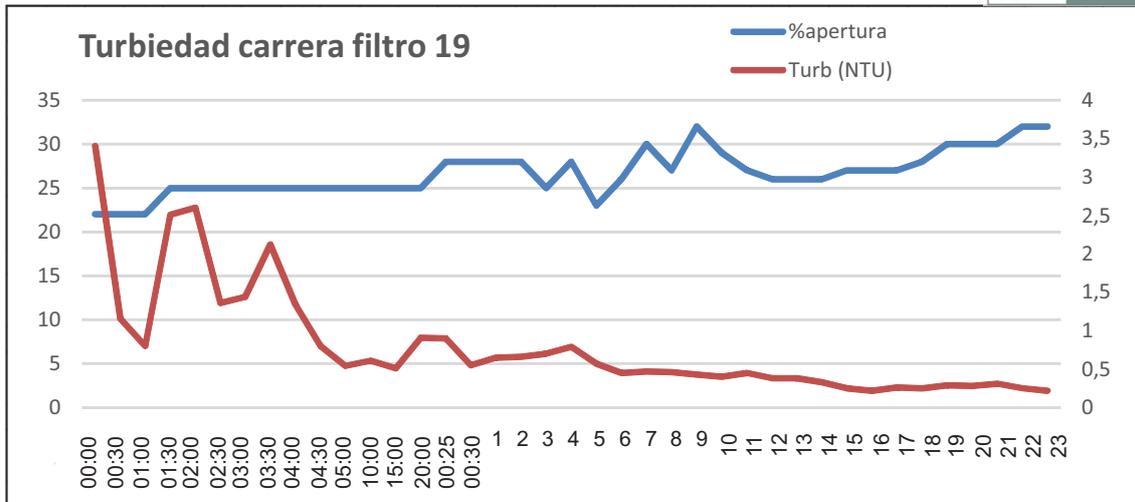
La carrera realizada duró 26 horas y se observa una etapa de maduración de aproximadamente 5 horas, en la cual solo el 33% supera el valor de 0,5 NTU, y luego de esa etapa el 100% de las mediciones son menores a 0,5 NTU y mayores a 0,2 NTU. Por lo tanto, se considera un buen funcionamiento del filtro. Se ha respetado el tiempo de la carrera, y no se ha postergado hasta llegar al 100% de la colmatación del manto filtrante ya que la turbiedad y la apertura de la válvula se mantienen prácticamente constantes las últimas 4 horas. También se ha observado que el filtro funciona continuamente con la apertura de la válvula siempre menor al 50%, es decir que solo la mitad del manto filtrante llega a colmatarse.

c) Filtro número 19:

Fecha: 18/05/2018	
Carrera: 24 horas	
	Turb. (NTU)
Agua cruda	6,9
Agua decantada	1,46
Agua filtrada	0,37

	Tiempo (min)	%apertura de la válvula	Turb (NTU)
18-may	00:00	22	3,4
	00:30	22	1,16
	01:00	22	0,8
	01:30	25	2,51
	02:00	25	2,6
	02:30	25	1,36
	03:00	25	1,44
	03:30	25	2,12
	04:00	25	1,34
	04:30	25	0,8
	05:00	25	0,54
	10:00	25	0,61
	15:00	25	0,51
	20:00	25	0,91
	25	28	0,9
	30	28	0,55
	1	28	0,65
	2	28	0,66
	3	25	0,7
	4	28	0,79
	5	23	0,57
	6	26	0,45
	7	30	0,47
	8	27	0,46
9	32	0,43	
10	29	0,4	
11	27	0,45	
12	26	0,38	
13	26	0,38	
14	26	0,33	

	Tiempo (min)	%apertura de la válvula	Turb (NTU)
19-may	15	27	0,25
	16	27	0,22
	17	27	0,26
	18	28	0,25
	19	30	0,29
	20	30	0,28
	21	30	0,31
	22	32	0,25
	23	32	0,22



Observaciones de los datos obtenidos:

La carrera realizada duro 24 horas, en la cual la etapa de maduración fue de 5 horas aproximadamente, en las cuales el 40% de las mediciones la turbiedad fue mayor a 1 NTU, e incluso hubo turbiedades mayores a 2 NTU, lo que se considera una etapa no muy eficiente. Luego en la etapa estacionaria se observa un buen rendimiento del filtro, donde el 100% de las mediciones fueron menores a 0,5 NTU y mayores a 0,2 NTU. La carrera podría haberse seguido, ya que él % de apertura de la válvula aun era mínima y la calidad del agua filtrada muy cercana a la deseada, pero por programación se decidió lavarlo. También se ha observado que el filtro funciona continuamente con la apertura de la válvula siempre menor al 35%,

d) Filtro número 12:

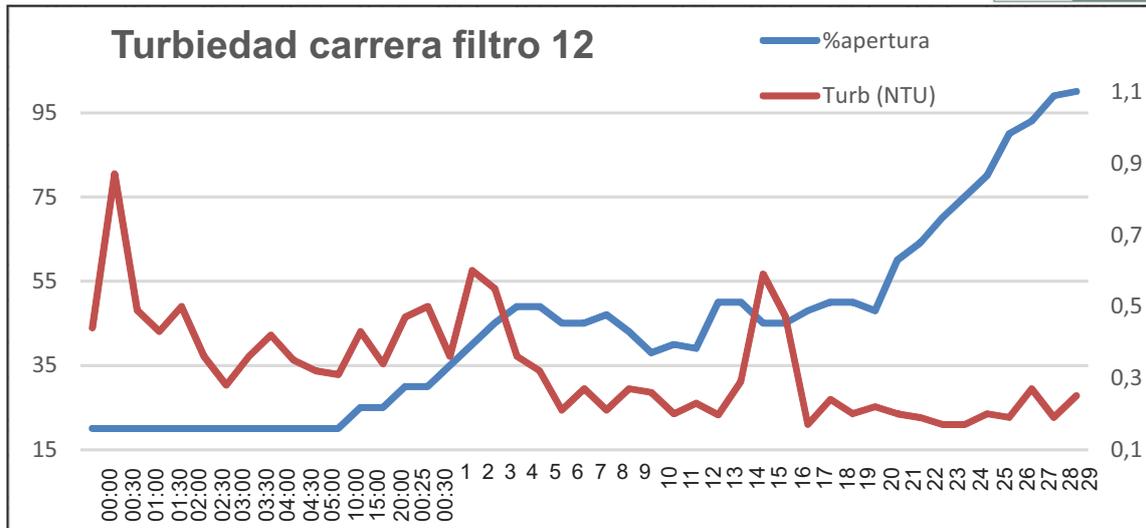
Fecha: 24/04/2018	
Carrera: 24 horas	
	Turb. (NTU)
Agua cruda	1,5
Agua decantada	0,74
Agua filtrada	0,23

24-abr

Tiempo (min)	%apertura de la válvula	Turb (NTU)
00:00	20	0,44
00:30	20	0,87
01:00	20	0,49
01:30	20	0,43
02:00	20	0,5
02:30	20	0,36
03:00	20	0,28
03:30	20	0,36
04:00	20	0,42
04:30	20	0,35
05:00	20	0,32
10:00	20	0,31
15:00	25	0,43
20:00	25	0,34
25	30	0,47
30	30	0,5
1	35	0,36
2	40	0,6
3	45	0,55
4	49	0,36
5	49	0,32
6	45	0,21
7	45	0,27
8	47	0,21
9	43	0,27
10	38	0,26
11	40	0,2
12	39	0,23
13	50	0,197
14	50	0,29

25-abr

Tiempo (min)	%apertura de la válvula	Turb (NTU)
15	45	0,59
16	45	0,47
17	48	0,17
18	50	0,24
19	50	0,2
20	48	0,22
21	60	0,2
22	64	0,19
23	70	0,17
24	75	0,17
25	80	0,2
26	90	0,19
27	93	0,27
28	99	0,19
29	100	0,25



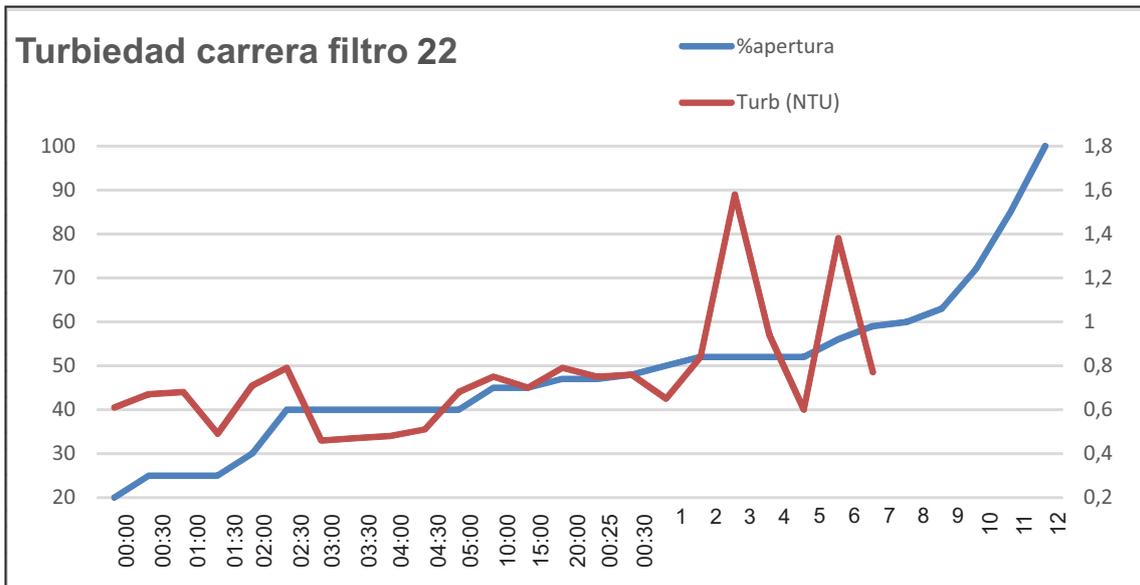
Observaciones de los datos obtenidos:

La carrera del filtro duro 29 horas y el ensayo se realizó hasta que la apertura de la válvula fue del 100%. Se observa que la etapa de maduración duró aproximadamente dos horas sin embargo prácticamente solo dos mediciones superan los 0,5 NTU, lo cual significa una excelente eficiencia del filtro. Luego de esa etapa la turbiedad del agua comienza a disminuir hasta llegar a sus valores esperados (aprox. 0,2 NTU). Luego de las 29 horas, se podría seguir filtrando, debido a que su turbiedad sigue siendo la esperada, pero la colmatación del filtro ha llegado a su máximo; por lo cual se debe proceder al lavado de dicho filtro.

e) Filtro número 22:

Fecha: 22/05/2018	
Carrera: 24 horas	
	Turb. (NTU)
Agua cruda	5,6
Agua decantada	0,96
Agua filtrada	0,24

	Tiempo (min)	%apertura de la válvula	Turb (NTU)
22-may	00:00	20	0,61
	00:30	25	0,67
	01:00	25	0,68
	01:30	25	0,49
	02:00	30	0,71
	02:30	40	0,79
	03:00	40	0,46
	03:30	40	0,47
	04:00	40	0,48
	04:30	40	0,51
	05:00	40	0,68
	10:00	45	0,75
	15:00	45	0,7
	20:00	47	0,79
	25	47	0,75
	30	48	0,76
	1	50	0,65
	2	52	0,84
	3	52	1,58
	4	52	0,94
	5	52	0,6
	6	56	1,38
	7	59	0,77
	8	60	
9	63		
10	72		
11	85		
12	100		



Observaciones de los datos obtenidos:

Dicho filtro tuvo un desperfecto y luego de las 7 horas el grifo dejó de brindar agua, sin embargo se consideró una muestra representativa ya que la carrera duró solo 12 horas, de las 24 horas programadas anteriormente.

En dicha carrera se observan turbiedades elevadas, de las cuales el 80% de las mediciones la turbiedad es mayor a 0,5 NTU y el 100% mayores a 0,45 NTU. Incluso llegando a turbiedades mayores a 1,5 NTU.

También se ha observado que el filtro aproximadamente a las 10 horas de funcionamiento la válvula llega al 100% de su apertura, esto significa que continuamente el filtro funciona más de la mitad de su carrera con su manto filtrante totalmente colmatado.

7- Lavado de filtro

El lavado del filtro es la operación por lo cual se suspende el proceso de filtración y se inyecta agua por la parte inferior del filtro (drenes) con presión adecuada, con el objeto de que los granos se froten y se desprenda todo el material que ha quedado retenido entre ellos en la operación de filtrado.

Este proceso debe hacerse cada vez que la pérdida de carga es igual a la presión estática sobre el lecho, o la calidad del efluente desmejore. Es decir, el lavado se deberá realizar cuando:

- ✓ La colmatación del manto sea del 100%
- ✓ La turbiedad sea mayor a 0,2 NTU.

La mayoría de los problemas del filtro se originan en un lavado deficiente incapaz de:

- a) Desprender la película que recubre los granos del lecho
- b) Romper las grietas o cavidades en donde se acumulan el material que trae el agua.

El material no removido queda atrapado entre los granos del medio y al progresar la carrera de filtración se compacta, con lo que la superficie del filtro desciende lentamente.

Al poseer varios filtros es importante evitar por todos los medios lavar consecutivamente todos los filtros.

7.1- Lavado con flujo ascendente:

El lavado que se realiza en el filtro AQUAZUR V es con Aire y Agua y consta de las siguientes etapas:

- 1- Aire sólo – Tiempo 1 minuto, cantidad 55 Nm³/m²/h
- 2- Aire + Agua a Bajo Caudal - Tiempo 7 minutos, cantidad de aire 55 Nm³/m²/h, velocidad del agua de lavado de 7 a 10 m/h.



Imagen N° 25: Primer etapa de lavado

- 4- Purga de Aire Falso Fondo 3 minutos
- 5- Agua Alto Caudal – Tiempo de 5 a 7 minutos, velocidad 16 a 19 m/h



Imagen N° 26: Segunda etapa de lavado.

Una característica importante de este lavado es que no se produce expansión del manto.

El agua se inyecta por los drenes invirtiendo la corriente (el agua se introduce de abajo hacia arriba), denominado "retro lavado".

Para lechos de arena fina de diámetro entre 0,45 a 0,55 cms deben complementarse con lavado superficial. El lavado superficial se realiza inyectando agua a presión sobre la superficie del lecho filtrante para romper las bolas de barro.

En la planta, para el lavado superficial, se presentan los rociadores fijos, los cuales aplican el flujo a toda la superficie del filtro simultáneamente. Consisten en toberas colocados a poca altura (5 a 10 cms) sobre el lecho y en las cuales se dejan boquillas u orificios pequeños, de manera que los chorros de agua se proyectan directamente contra la capa superficial del medio filtrante. Los tubos distribuidores de 1 1/2" a 3 " se colocan con espaciamientos entre 60 y 90 cms. Se usan tasas de flujo de 80 a 160 lts/min/m² con presiones de 15 a 25 mts. La presión depende de la altura del tanque, y se deben considerar las pérdidas.

El agua para el lavado puede provenir de:

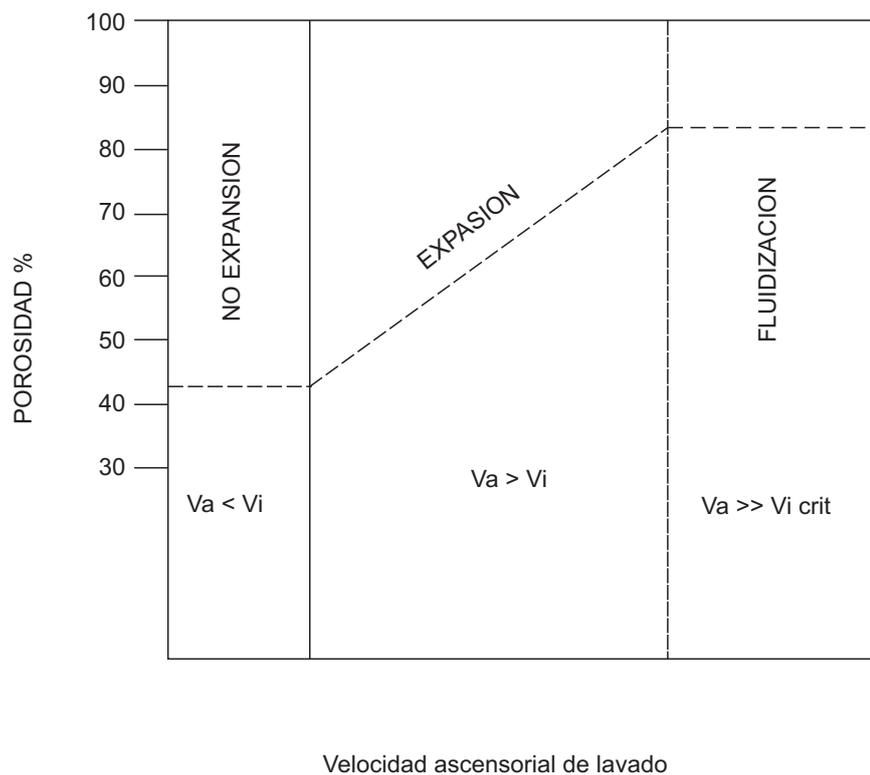
- ✓ Tanque elevado.
- ✓ Un sistema de bombeo.
- ✓ Otros filtros trabajando en paralelo.

En el caso de la planta Suquia, el agua de lavado proviene de un tanque elevado.

7.2- Hidráulica de lavado:

Al inyectar agua por el fondo en un medio granular, tres cosas pueden ocurrir:

- Si la velocidad ascensorial (V_a) del flujo de lavado es menor que la velocidad de asentamiento de las partículas del medio filtrante (V_i); el lecho no se expande.
- Cuando se sigue aumentando la rata de flujo hasta vencer V_a mayor que V_i , el lecho se expande más y más y su porosidad p aumenta proporcionalmente.
- Cuando la velocidad de flujo del lavado sobrepasa el valor V_i crítico, el lecho todo se "fluidiza" y los granos del medio son acarreados por el agua.



7.3- Reciclaje de las aguas de lavado:

Las aguas de lavado de filtros tienen una importante concentración en microorganismos retenidos durante la filtración. El tenor en quistes y oocistos de estas aguas es muy superior a la del agua bruta (mas de 10 veces, en termino medio). Estas aguas pueden ser descartadas al desagüe en algunas explotaciones que aceptan una perdida en agua de aproximadamente 2%. En la planta, aproximadamente el 2% del caudal de proceso se utiliza para el lavado de los filtros.

El reciclado de estas aguas es posible en las siguientes condiciones:

- ✓ Tratamiento de estas aguas antes del retorno en cabeza:
 - Adición de coagulante y/o de polielectrolitos,
 - Decantación simple o frotación, con el fin de eliminar al menos el 90% de los floculos formados
 - Lodos tratados con los lodos de las decantadores de la planta con el objetivo de un sobrenadante < 10 NTU.

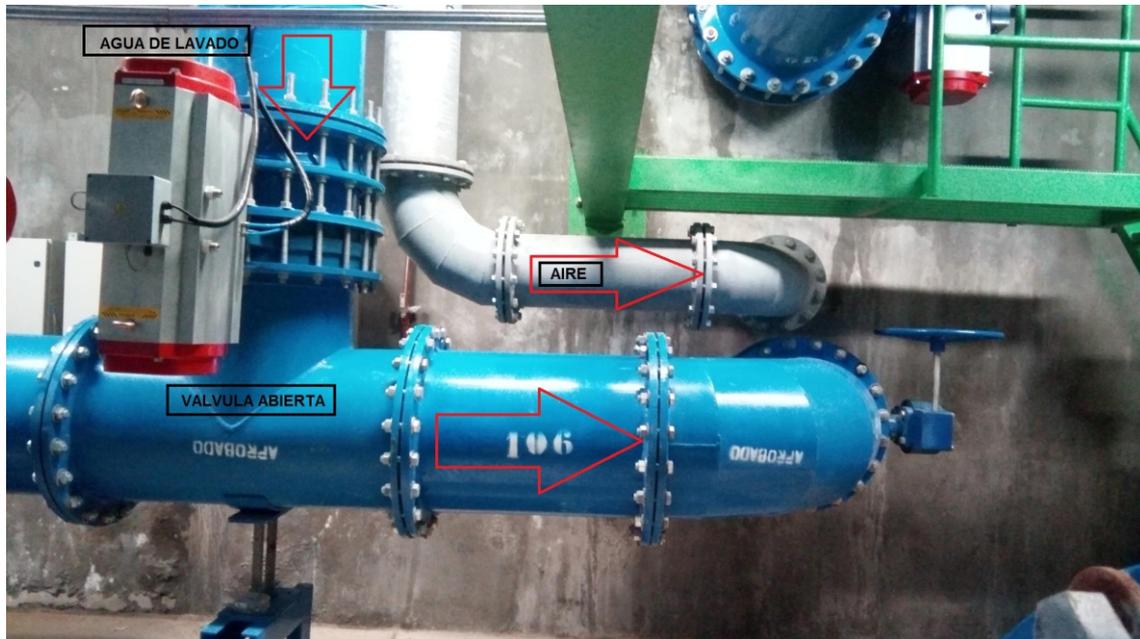
- ✓ Caudal de reciclaje:
 - < al 5% del caudal de alimentación en agua bruta de la planta en condiciones normales de explotación.
 - < al 10% en condiciones excepcionales (caudal mínimo de protección, fuerte velocidad de lavado)
- ✓ Almacenamiento de las aguas de lavado en un tanque tampón agitado, permitiendo una buena gestión del tratamiento y del caudal de reciclaje.

- ✓ Control del impacto del reciclaje sobre la demanda en coagulante del agua bruta + reciclaje.

En la planta, el reciclaje de las aguas de lavado se realiza mediante una **planta de tratamiento de lodos**, donde se dirigen tanto las aguas de lavado como la purga de los decantadores y de la cal.

7.4- Procedimiento de muestreo de turbiedad durante el lavado del filtro:

A continuación se mostrara la sala bajo filtro y el esquema de operación durante el lavado:



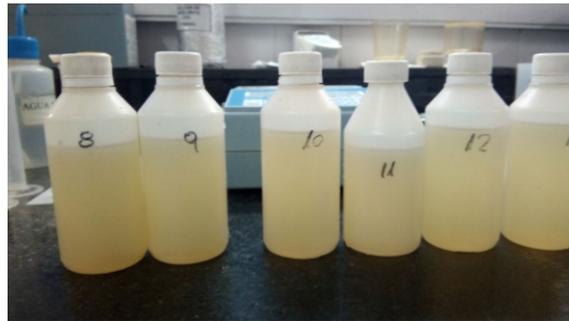
Y el procedimiento es el siguiente:

1- Dejar que el nivel del agua baje hasta cierta altura

2- Cuando se abre la válvula de lavado se toman las muestras cada 30 segundos. Es importante que las muestras sean retiradas de la zona del canal de desagüe, de manera de asegurar que las muestras obtenidas sean de ambos lados del filtro.



3- Cada muestra será colocada en un recipiente, enumerado para distinguir cada muestra.



4- El retiro de muestras se realiza hasta que el lavado finalice.

5- Luego se llevan las muestras y se calcula la turbiedad de cada una.



El nombre del equipo es: HACH 2100N Turbidimeter.

6- De esa manera se obtendrá una curva de turbiedad vs tiempo.

7.5- Ensayos de turbiedad durante el lavado de los filtros:



Para una simplificación del estudio se ha tomado un filtro representante por cuadrante, para ser estudiado. Considerando:

Primer cuadrante: Filtros **1***, 3, 5, 7, 9

Segundo cuadrante: Filtros **2***, 4, 6, 8, 10

Tercer cuadrante: Filtros 11, **13***, 15, 17, 19

Cuarto cuadrante: Filtros **12***, 14, 16, 18, 20

Quinto cuadrante: Filtros 21, **22***, 23, 24

(*Los filtros que se encuentran en negrita fueron los seleccionados para el estudio)

Objetivo: Se considera que un lavado ha sido eficiente cuando la turbiedad de la última muestra de lavado es cercana o menor a la turbiedad del agua decantada.

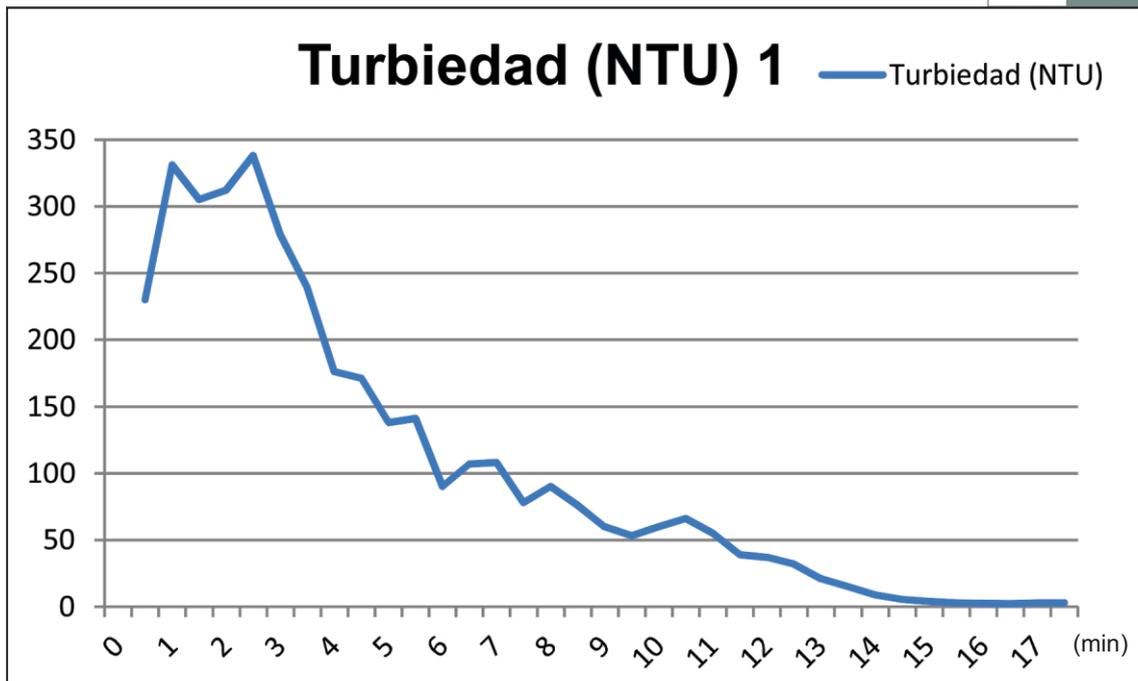
a) Filtro número 1:

Fecha: 11/05/2018
Caudal 1º Etapa: 490 m3/h
Tiempo 1º Etapa: 480 seg.
Caudal 2º Etapa: 1050 m3/h
Tiempo 2º Etapa: 360 seg.
Apertura de válvula: 60 %
Carrera: 17 hs.

	Turb. (NTU)
Agua cruda	31,4
Agua decantada	1,466
Agua filtrada	0,23

Lavado Filtro N° 1	
Tiempo (min)	Turbiedad (NTU)
0	
0,5	230
1	331
1,5	305
2	312
2,5	338
3	279
3,5	239
4	176
4,5	171
5	138
5,5	141
6	90
6,5	107
7	108
7,5	78
8	90
8,5	76
9	60
9,5	53
10	60
10,5	66
11	55
11,5	39
12	37
12,5	32

Lavado Filtro N° 1	
Tiempo (min)	Turbiedad (NTU)
13	21
13,5	15
14	8,77
14,5	5,41
15	4,07
15,5	2,87
16	2,5
16,5	2,2
17	2,9
17,5	2,9



Observaciones de los datos obtenidos:

Día previo al lavado hubo una disfunción en la planta y los filtros no se lavaron durante varias horas (12hs a 24hs inclusive), pero solo se atrasaron de su rutina un par de horas, debido a eso la próxima carrera disminuyó de 28 hs a 17 hs. Aun así, se observa que la apertura de la válvula es del 60%, lo que implica que el filtro aún tenía carrera para brindar. La curva de lavado muestra una curva típica, en la cual los primeros 2 minutos y medio la turbiedad aumenta y luego empieza a descender progresivamente. El resultado obtenido al final del lavado no es el óptimo, ya que se esperan turbiedades menores o cercanas a 2 NTU; esto podría ser solucionado aumentando unos minutos el tiempo de lavado (aprox 2 minutos).

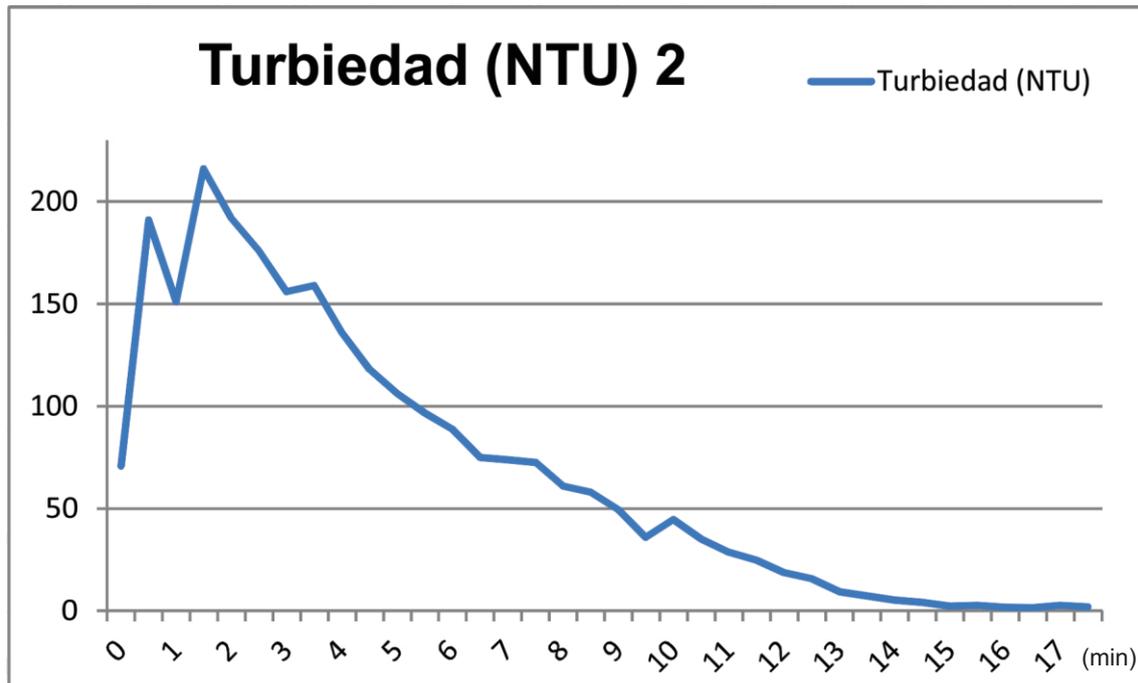
b) Filtro número 2:

Fecha: 7/05/2018
Caudal 1º Etapa: 490 m3/h
Tiempo 1º Etapa: 480 seg.
Caudal 2º Etapa: 1050 m3/h
Tiempo 2º Etapa: 360 seg.
Apertura de válvula: 57 %
Carrera: 27 hs.

	Turb. (NTU)
Agua cruda	3,6
Agua decantada	1,019
Agua filtrada	0,3

Lavado Filtro N° 2	
Tiempo (min)	Turbiedad (NTU)
0	70,6
0,5	191
1	151
1,5	216
2	192
2,5	176
3	156
3,5	159
4	136
4,5	118
5	106
5,5	96,6
6	88,7
6,5	75
7	73,9
7,5	72,5
8	60,8
8,5	57,8
9	49,3
9,5	35,9
10	44,5
10,5	35
11	28,6
11,5	24,7
12	18,5

Lavado Filtro N° 2	
Tiempo (min)	Turbiedad (NTU)
12,5	15,7
13	9,4
13,5	7,3
14	5,3
14,5	4,2
15	2,2
15,5	2,6
16	1,64
16,5	1,52
17	2,7
17,5	1,9



Observaciones de los datos obtenidos:

Se ha terminado de tomar las muestras antes de que se cierre la válvula de desagüe, ya que prácticamente no circulaba agua por dicho canal. Primero se observa que el lavado se realizó cuando la apertura de la válvula era solo del 57%, por lo que la carrera se podría haber extendido unas horas más para este filtro. Luego se observa un buen rendimiento del lavado del filtro ya que finaliza el lavado con una turbiedad óptima.

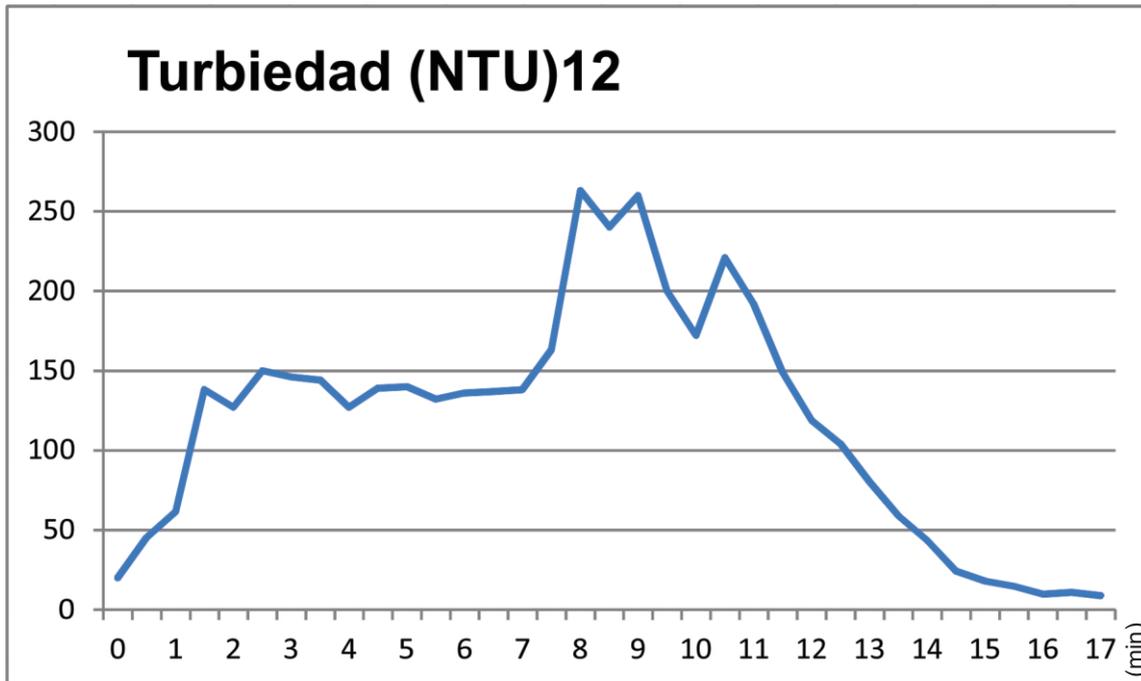
c) Filtro número 12:

Fecha: 24/04/2018
Caudal 1º Etapa: 490 m3/h
Tiempo 1º Etapa: 480 seg.
Caudal 2º Etapa: 1050 m3/h
Tiempo 2º Etapa: 360 seg.
Apertura de válvula: 100 %
Carrera: 24 hs

	Turb. (NTU)
Agua cruda	1,5
Agua decantada	0,74
Agua filtrada	0,23

Lavado Filtro N° 12	
Tiempo (min)	Turbiedad (NTU)
0	19,9
0,5	45,3
1	61,5
1,5	138
2	127
2,5	150
3	146
3,5	144
4	127
4,5	139
5	140
5,5	132
6	136
6,5	137
7	138
7,5	163
8	263
8,5	240
9	260
9,5	200
10	172
10,5	221
11	192
11,5	149
12	119
12,5	104
13	80,3
13,5	59,1

Lavado Filtro N° 12	
Tiempo (min)	Turbiedad (NTU)
14	43,5
14,5	24,1
15	17,8
15,5	14,7
16	9,75
16,5	10,8
17	8,85



Observaciones de los datos obtenidos:

Durante este lavado se observan turbiedades muy elevadas hasta los 12 minutos aproximadamente, esto sería durante toda la primera fase y mitad de la segunda fase de lavado. Esto podría darse debido a que el porcentaje de la apertura de la válvula previo al lavado era del 100%, es decir que todo el manto del filtro se encontraba colmatado. Luego la turbiedad desciende rápidamente durante los últimos minutos, pero esos minutos no son suficientes para que la turbiedad llegue a los valores esperados; por lo que una solución sería aumentar el tiempo de lavado en la segunda fase (aprox. 1 min.), de manera de alcanzar turbiedades más bajas.

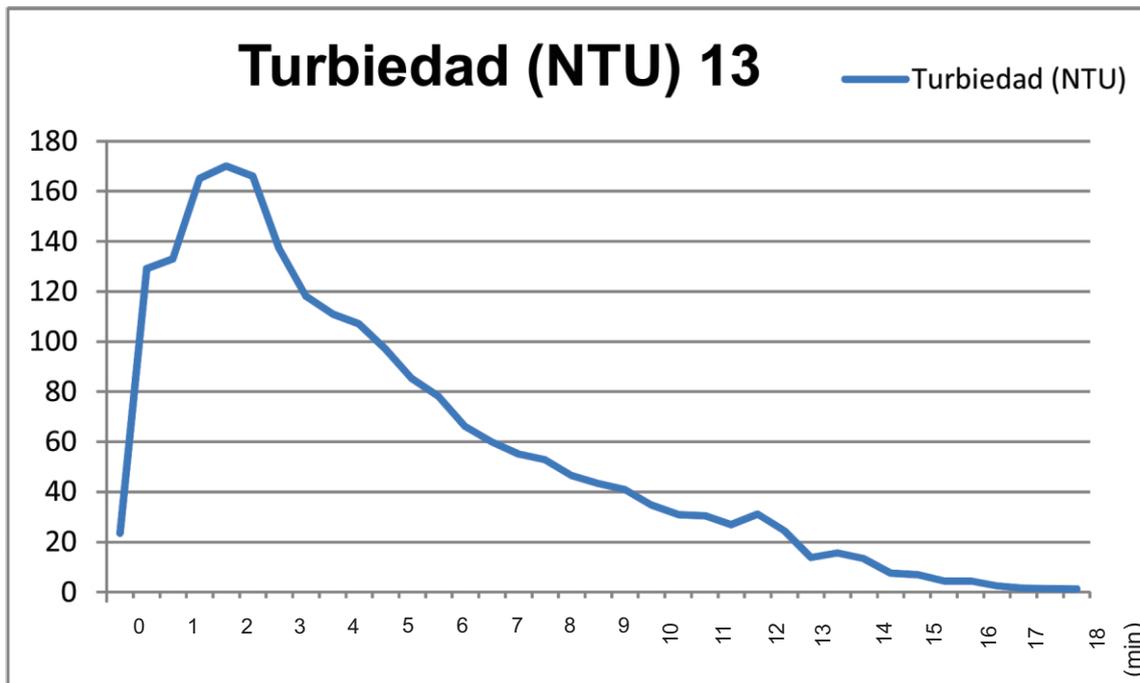
d) Filtro número 13:

Fecha: 27/04/2018
Caudal 1º Etapa: 490 m3/h
Tiempo 1º Etapa: 480 seg
Caudal 2º Etapa: 1050 m3/h
Tiempo 2º Etapa: 360 seg
Apertura de válvula: 49 %
Carrera: 24 hs

	Turb (NTU)
Agua cruda	
Agua decantada	0,944
Agua filtrada	0,25

Lavado Filtro N° 13	
Tiempo (min)	Turbiedad (NTU)
0	23,4
0,5	129
1	133
1,5	165
2	170
2,5	166
3	137
3,5	118
4	111
4,5	107
5	97
5,5	85
6	78
6,5	66,1
7	59,9
7,5	55
8	52,8
8,5	46,4
9	43,3
9,5	40,9
10	34,7
10,5	30,9
11	30,5
11,5	26,9
12	31,1
12,5	24,4
13	13,8
13,5	15,6

Lavado Filtro N° 13	
Tiempo (min)	Turbiedad (NTU)
14	13,3
14,5	7,6
15	7,01
15,5	4,41
16	4,4
16,5	2,54
17	1,56
17,5	1,47
18	1,33



Observaciones de los datos obtenidos:

En este ensayo se observa claramente como la turbiedad aumenta durante los primeros dos minutos de la primera fase de lavado, en donde el agua y el aire están actuando y se van eliminando primero las partículas más superficiales. Y luego la turbiedad disminuye considerablemente hasta valores cercanos al agua decantada. También se observa que en el momento previo al lavado la apertura de la válvula era solo del 49%, lo que significa que solo la mitad del manto se encontraba colmatado y aun podría seguir filtrando; debido a eso la turbiedad del lavado no es elevada y desciende rápidamente luego de los primeros minutos.

e) Filtro número 22:

Fecha: 23/04/2018
Caudal 1º Etapa: 490 m3/h
Tiempo 1º Etapa: 550 seg
Caudal 2º Etapa: 1050 m3/h
Tiempo 2º Etapa: 480 seg
Apertura de válvula: 100 %
Carrera: 24 hs

	Turb (NTU)
Agua cruda	1,8
Agua decantada	1,1
Agua filtrada	0,27

Lavado Filtro N° 22	
Tiempo (min)	Turbiedad (NTU)
0	
0,5	51,7
1	95
1,5	152
2	155
2,5	157
3	160
3,5	139
4	141
4,5	141
5	142
5,5	136
6	126
6,5	112
7	107
7,5	108
8	104
8,5	97,5
9	90
9,5	80
10	72
10,5	69,2
11	56,9
11,5	50,8
12	48,4
12,5	34,7
13	26,2
13,5	25,9

Lavado Filtro N° 22	
Tiempo (min)	Turbiedad (NTU)
14	17,2
14,5	12,7
15	10,5
15,5	8,8
16	6,5
16,5	3,35
17	3,03
17,5	2,27

7.6- Control del proceso de filtración:

Se analiza las condiciones en que éste se desarrolla, específicamente la precisión de los datos suministrados por los equipos de control y medida del flujo del filtro, así como el estado en que se encuentra el medio granular que se usa.

Conocida ésta información, evaluar la eficiencia con que se está desarrollando el proceso en lo referente a remoción de microorganismos y partículas suspendidas.

A. El primer tipo de estudio comprende:

1- Precisión de los instrumentos de control de filtración:

- a) Medidor del Q de filtración.
- b) Medidor de pérdida de carga.
- c) Amplitud de las oscilaciones de la pérdida de carga.

2- Control de lavado:

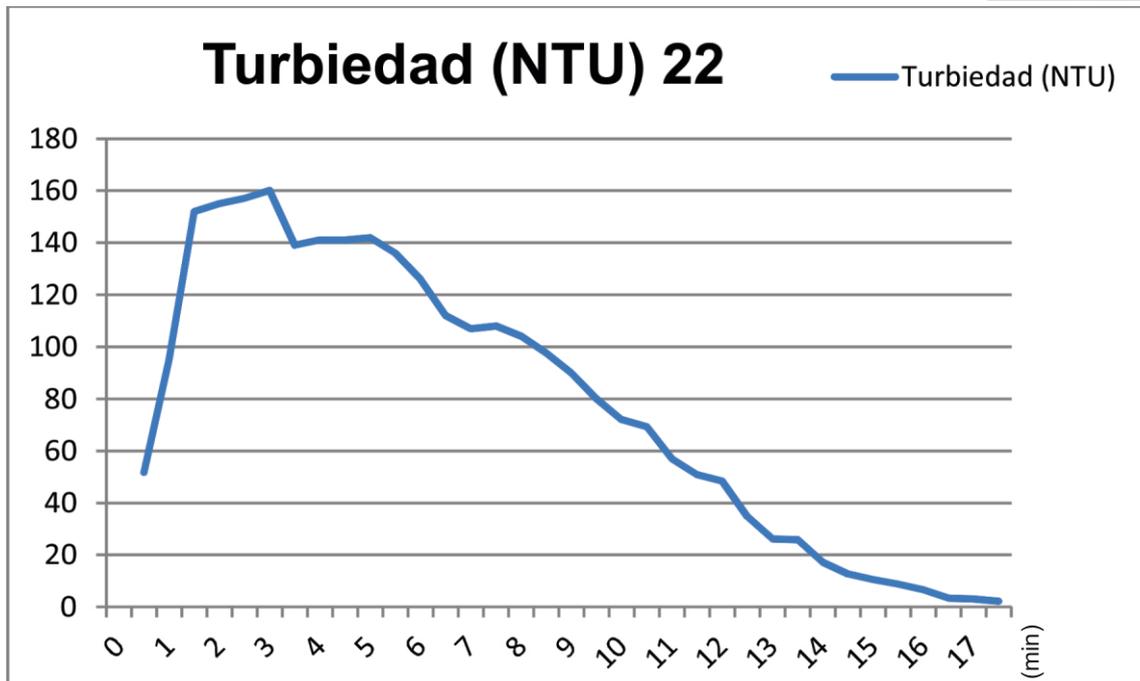
- a) Controlador de caudal de lavado.
- b) Duración del lavado.
- c) Expansión de la arena.
- d) Desplazamiento de la grava.
- e) Trampas de arena.

3- Análisis del medio filtrante:

- a) Granulometría.
- b) Determinación de bolas de barro.
- c) Peso específico.
- d) Porosidad.
- e) Dureza.
- f) Solubilidad en ácido clorhídrico.

B. El segundo tipo de estudio es:

- 1- Medición de turbiedad.
- 2- Medición de número de partículas.
- 3- Medición del aluminio residual.
- 4- Tapón de algodón.
- 5- Filtros pilotos.



Observaciones de los datos obtenidos:

En este ensayo se observan que los tiempos de lavado de este cuadrante es mayor que el de los otros cuatro cuadrantes, sin embargo se observa que las turbiedades al finalizar el lavado no son menores, aunque el tiempo de lavado sea mayor. Una de las razones de esto puede ser porque el % de apertura de la válvula antes de realizarse el lavado era del 100%, lo que significa que el manto filtrante se encontraba totalmente colmatado.

8- Comparaciones

8.1- Planta Los Molinos:

La Planta Potabilizadora Los Molinos se ubica al sur de la ciudad de Córdoba y abastece al 30% de la población, con un caudal máximo de 7.200 m³/h. El agua proviene del Lago Los Molinos y se dirige a la planta por un canal a cielo abierto hasta las rejas y luego por tubería hasta la entrada de la planta Los Molinos.

El proceso de la planta consta de las siguientes etapas:

a) Pre-tratamiento:

En una primera etapa se encuentran las rejas gruesas y seguidamente las rejas finas. También cuenta con la colocación de CAP (Carbono Activado en Polvo), que se coloca excepcionalmente cuando el agua tiene problemas de olor y sabor; actualmente no se está utilizando.



Imagen N° 25: Canal de agua cruda

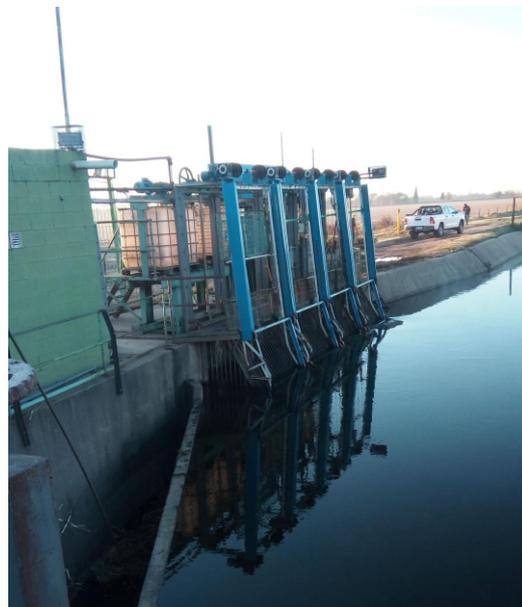


Imagen N° 26: Rejas gruesas y finas.

Luego en la planta se tiene un pre-tratamiento químico con Ácido clorhídrico al 33%.

b) Coagulación (mezcla rápida) y Flocculación:

La planta posee como coagulante PAC, el cual se utiliza habitualmente, y también posee Sulfato de Aluminio el cual es utilizado solo cuando el contenedor de PAC debe ser limpiado (una vez al año) o en caso de considerarlo necesario.

También se almacena Poli-electrolito catiónico, el cual es un súper coagulante, el cual se utiliza para eventos en los cuales la turbiedad es alta (mayor a 400 NTU).

c) Decantación:

Se cuenta con 4 decantadores laminares, con un tamaño de 700 m² cada uno. Y con una velocidad de agua decantada de 2,57 m/h.



Imagen N° 27: Partes de los Decantadores Laminar

En las imágenes se observa el funcionamiento del Decantador, en el cual el agua ingresa por la parte inferior de los paneles, en donde el floc queda retenido en la parte inferior o entre los paneles y se recolecta superficialmente el agua decantada, que se dirige hacia los filtros.

d) Filtración:

La planta posee 16 filtros de 36 m² cada uno; distribuidos en dos alas de 8 filtros cada una; con las siguientes características:

- Principio de funcionamiento: por presión hidrostática
- Manto filtrante: 1,30 mts de espesor y compuesto por arena
- Velocidad de filtración: 12,5 m/h
- Lavado: mixto (agua + aire)



Imagen N° 28: Filtro Los Molinos

e) Desinfección:

La desinfección del agua se realiza con Cloro, y se inyecta en la cañería de agua filtrada. Se coloca 300 Kg/ día.

f) Alcalinización:

Por último se coloca lechada de cal (agua + cal) en las cisternas de reservas de 22.000 m³ cada una. Se coloca 15 lts/min.

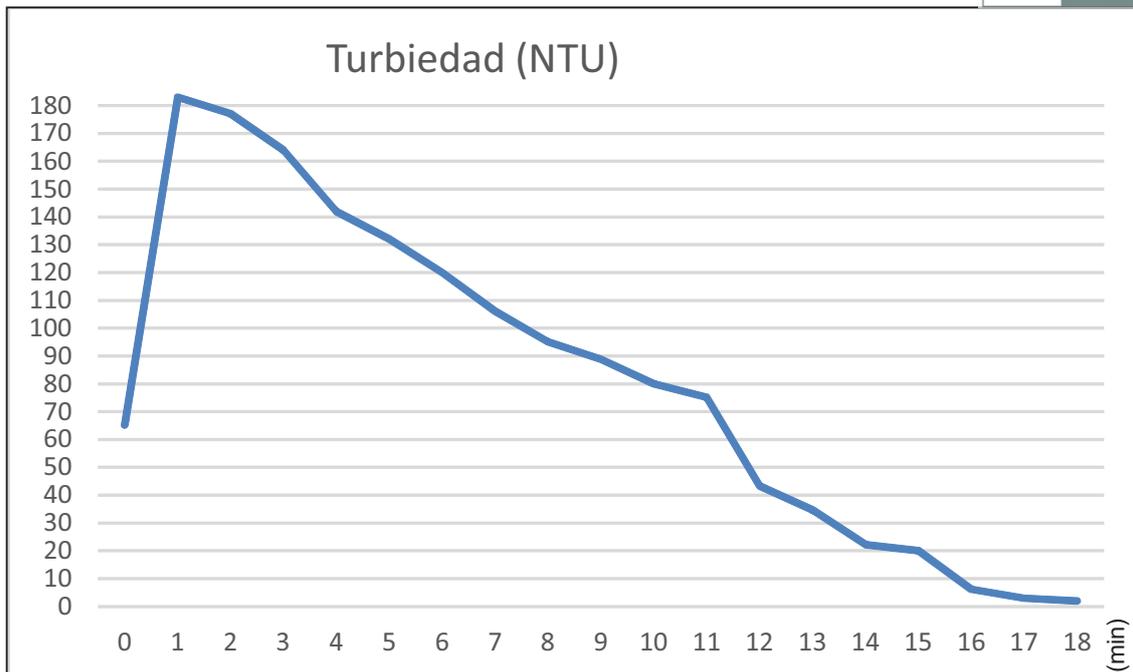
- Se ha realizado un lavado y una carrera de un filtro, para ver su funcionamiento. Los datos obtenidos se observan a continuación

LAVADO:

Fecha: 07/06/2018
Caudal 1º Etapa: 240 m3/h
Tiempo 1º Etapa: 540 seg.
Caudal 2º Etapa: 720 m3/h
Tiempo 2º Etapa: 540 seg.
Tiempo de vaciado: 10 min
Apertura de válvula: 100 %
Carrera: 9 hs.

	Turb. (NTU)
Agua cruda	1,4
Agua decantada	2,1
Agua filtrada	0,2

Lavado Filtro N° 6	
Tiempo (min)	Turbiedad (NTU)
0	65,2
1	183
2	177
3	164
4	142
5	132
6	120
7	106
8	95,1
9	88,8
10	79,9
11	75,1
12	43,2
13	34,7
14	22,2
15	20,1
16	6,16
17	2,88
18	2



Observaciones de los datos obtenidos:

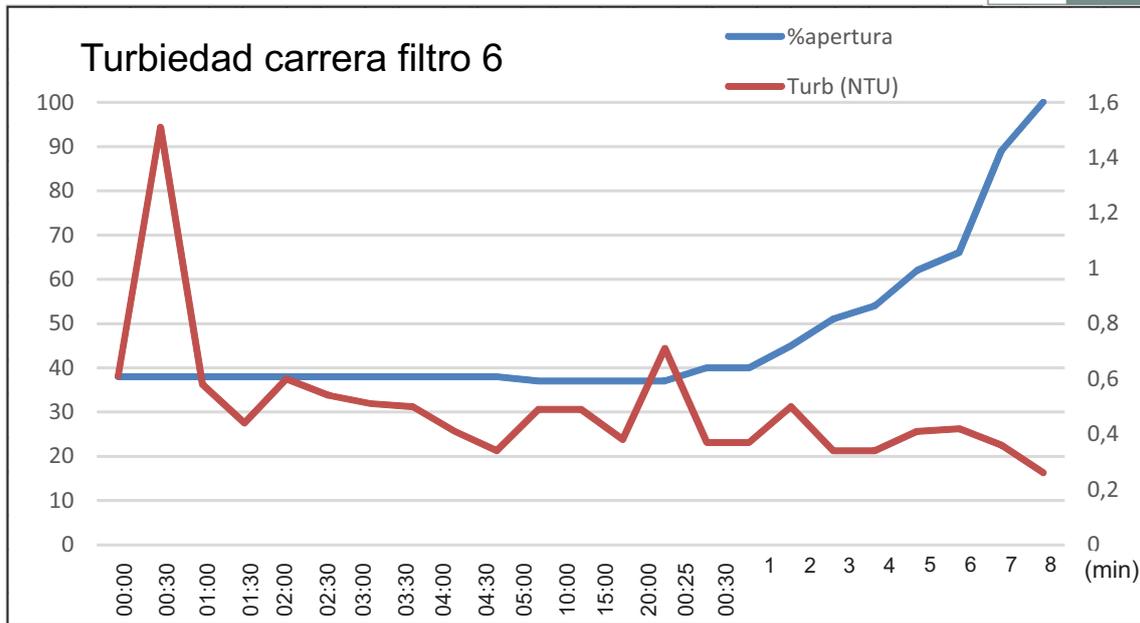
Se observa una curva de lavado típica y terminando el lavado con buenos valores de turbiedad, ya que la turbiedad del agua decantada es de 2,1 NTU y el lavado finaliza con una turbiedad de 2 NTU. También se observa que el tiempo de duración del lavado es el óptimo; por lo que se considera un lavado eficiente.

También se observa una clarificación deficiente; ya que tiene una turbiedad mayor que la del agua decantada.

CARRERA DEL FILTRO:

Q salida: 5502 m ³ /h
Velocidad de Filtración: 10,7 m/h

	Tiempo (min)	%apertura	Turb (NTU)
07-jun	00:30	38	0,61
	01:00	38	1,51
	01:30	38	0,58
	02:00	38	0,44
	02:30	38	0,6
	03:00	38	0,54
	03:30	38	0,51
	04:00	38	0,5
	04:30	38	0,41
	05:00	38	0,34
	10:00	37	0,49
	15:00	37	0,49
	20:00	37	0,38
	25	37	0,71
	30	40	0,37
	1	40	0,37
	2	45	0,5
	3	51	0,34
	4	54	0,34
	5	62	0,41
6	66	0,42	
7	89	0,36	
8	100	0,26	



Observaciones de los datos obtenidos:

La primera observación es respecto al tiempo de la carrera, el cual es un tiempo muy corto para el funcionamiento de un filtro, lo que implica más lavados, lo que genera más pérdidas. Por otra parte se observa un excelente funcionamiento del manto filtrante durante la carrera, ya que todos los valores de turbiedad son aceptables (excepto el del minuto uno) y se puede considerar que no tiene etapa de maduración. Pero la apertura de la válvula de apertura alcanza rápidamente el 100%, esto puede ocurrir porque el floc generado no es eliminado totalmente en la etapa de decantación y se dirige hacia los filtros; entonces el floc cubre la zona superior del manto filtrante e imposibilita que se siga filtrando.

8.2- Planta de Formosa:

La ciudad de Formosa posee dos plantas potabilizadoras, las cuales abastecen a 230.000 habitantes aproximadamente. La captación del agua cruda se realiza desde el río Paraguay.

La planta más antigua se ubica en el centro de la ciudad y actualmente se utiliza como complemento de la otra planta. Tiene un caudal máximo de 2450 m³/h.

Luego la nueva planta (inaugurada en el año 2008) se ubica en el nor-este de la ciudad y posee un caudal máximo de 6.450 m³/h. La comparación se enfocara en esta planta, aunque ambas plantas poseen el mismo funcionamiento.

La planta cuenta con instalaciones para que su funcionamiento sea de forma automática, pero gran parte se encuentra funcionando de forma manual. Se considera que la planta tiene un rendimiento del 95%, aproximadamente.

a) Pre-tratamiento:

Se cuenta con rejas gruesas y finas en el lugar de la toma, y desde ahí el agua es bombeada a la planta, la cual se encuentra mediante un acueducto de 3,7 km de longitud.



Imagen N° 29: Entrada del Agua Cruda Planta Formosa

En la imagen N° 29 se observa el río Paraguay y el lugar de la toma los camalotes, son detenidos por las rejas gruesas. Dichos camalotes son eliminados de forma manual por operarios.

La planta tiene un caudal máximo de producción de 6.450 m³/h y un caudal mínimo producido de 3500 m³/h; con una turbiedad del agua cruda cercana a 20 NTU.

b) Coagulación y Floculación:

La planta utiliza como coagulante PAC (policloruro de aluminio). Antiguamente se utilizaba sulfato de aluminio, pero luego mediante ensayos se demostró que el PAC mejoraba todos los parámetros de calidad del agua, excepto el color. Legalmente la planta puede brindar un agua con hasta 10 unidades de color, y actualmente está brindando un agua entre 5 y 7 unidades de color.

c) Decantación:

Los decantadores cuentan con las siguientes características:

- Cantidad: 20 decantadores.
- Tipo de decantador: laminar.
- Área: 100 m² cada uno.
- Velocidad de decantación: 2 m/h.
- Turbiedad luego de la decantación: se encuentra entre 3 y 4 NTU.

d) Filtración:

Los filtros de la planta poseen las siguientes características:

- Cantidad: 20 filtros.
- Ancho: 6,10 m.
- Largo: 7,50 m.
- Profundidad: 4,40 m.
- Manto filtrante: dual, compuesto por arena y antracita.
- Poseen falso fondo.
- Principio de Funcionamiento: por presión hidrostática.
- Carrera de funcionamiento: 48hs a 72 hs.
- Velocidad de filtración: 3,73 m/h - rápida.



Imagen N° 30: Filtro Planta Potabilizadora Centro

En la imagen N° 30 se observa filtro de la Planta Potabilizadora del centro, en donde se visualiza el manto filtrante compuesto por antracita en la parte superior. Y las canaletas son el canal de desagüe del lavado.



-Planta Nueva- En esta imagen se observa el sensor del filtro, el cual indica la presión hidrostática.

Imagen N° 31: Filtro Planta Potabilizadora Nueva



Legalmente la planta puede brindar una calidad de agua de hasta 3 NTU, y actualmente **la turbiedad del agua filtrada es cercana a 1 NTU.**

El lavado de los filtros se realiza en una sola etapa, con agua en contracorriente; el tiempo del lavado es entre 12 y 15 minutos.



Imagen N° 32: Manipulación de válvulas de lavado Planta Vieja.

En la imagen se observa cómo se manipulan las válvulas del filtro durante el lavado, la cual es manual.

e) Desinfección y Alcalinización:

La desinfección se realiza con cloro gaseoso y la alcalinización con lechada de cal. Ambos son inyectados en la cisterna, la cual posee un volumen de 3000 m³..

Desde la Planta el agua se distribuye mediante bombeo a todos los sectores, ya que la región es llanura.

8.3- Planta de Pirané- Formosa:

Pirané es una ciudad ubicada al este de la ciudad de Formosa, cuenta con una población de aproximadamente 20.000 habitantes.

La planta tiene una antigüedad de 5 años y está a cargo de ella el SPAP (Servicio Provincial de Agua Potable y Saneamiento).

Está diseñada para un caudal máximo de 750 m³/h, la cual es suficiente para abastecer a toda la población. Hoy tiene una demanda solo de 320 m³/h.

El agua cruda es tomada por lagunas (represas) realizadas por el hombre con el fin de que las aguas de lluvias permanezcan allí y suministren el agua cruda necesaria, las cuales se encuentran cercanas a la planta.



Imagen N° 33: Laguna de reserva

En la imagen N° 33 se observa una de las lagunas, colmada por los camalotes; los cuales no tienen tratamiento alguno.

a) Pre-tratamiento:

En primera instancia se cuenta con un pre tratamiento físico que consta de rejas gruesas, luego el agua es bombeada (se cuenta con un total de 3 bombas) y dirigida hacia el pre tratamiento químico en el cual se realiza una Pre-cloración.

El agua cruda es agua de pantano y posee una turbiedad muy baja de 6 NTU aproximadamente, eso es un problema para el tratamiento. También posee un ph de 6, y normalmente tiene color y olor.

Como se ve en la imagen N° 34, se cuenta con tanques en donde se dosifica el Hipoclorito.



Imagen N° 34: Tanques de dosificación de Hipoclorito.

La planta está diseñada para que su pre tratamiento químico sea con Dióxido de Sodio, que se encuentra fuera de servicio.

b) Coagulación y Floculación:

La planta posee como coagulante Sulfato de Aluminio con un dosaje de 76 lts/h, aparte también coloca un superfloc (2650) para mejorar la unión de las partículas, debido a que la turbiedad del agua cruda es muy baja y eso dificulta la floculación.

El coagulante se inyecta en la cañería de impulsión, y el punto de inyección se encuentra en la cámara interna, la que se ve en la imagen N° 35, y luego elevado para dirigirlo hacia la zona de la floculación.



Imagen N° 35: Cámara interna.



Imagen N° 36: Punto de inyección de la cal.

Próximo a ello y antes de la canaleta Parshall, es colocado carbón activado el cual también se dosifica en lts/h y mejora las propiedades de olor, sabor y color.



Imagen N° 37: Punto de inyección del carbono activado.



En la imagen se observan valores brindados por la canaleta Parshall, la cual indica un caudal de 335,83 m³/h.

Luego el agua es dirigida hacia la zona de mezclado rápido, para favorecer la floculación; previo a la decantación.



c) Decantación:

La planta cuenta con decantadores de tipo Estático, con las siguientes características:

- Cantidad: 6 decantadores rectangulares.
- Volumen: 110 m³ cada uno.
- Carga superficial de 0,48 cm.
- Velocidad de decantación: 0,24 m/h.
- Limpieza: una vez a la semana se realiza una purga o eliminación del lodo acumulado.

En la siguiente imagen se observa una fila de 3 decantadores, a la izquierda se encuentran los otros 3 decantadores de forma simétrica.



Se observa un agua decantada cristalina sin elevación de lodo floculante. Lo que indica un buen proceso de Floculación, coagulación y decantación.

Imagen N° 38: Decantadores Planta Potabilizadora Pirané.

También se observa que la planta no posee tratamiento para los lodos eliminados en la decantación.

d) Filtración:

Los filtros poseen las siguientes características:

- Cantidad: 8 filtros.
- Manto de arena.
- Ancho: 3,80 mts.
- Largo: 5,0 mts.
- Altura: 5,80 mts.
- Velocidad de filtración: 2,1 m/h (rápida).
- Principio de funcionamiento: Presión hidrostática (la cual es indicada mediante una regla).
- Lavado: a contrapresión con agua.



Imagen N° 39: Filtros Planta Potabilizadora Pirané.

En la imagen N° 39 se observa el filtro en funcionamiento, con su válvula de descarga abierta. Así funciona por 3 días consecutivos hasta su lavado.

El lavado de los filtros se realiza con una carrera de 72 hs, y cada lavado dura aproximadamente 15 minutos, dependiendo de la evolución del lavado, y se realiza de forma manual. El agua de lavado proviene de una estación de bombeo.



Imagen N° 40: Filtros durante el lavado.

Las imágenes son una secuencia del lavado de un filtro. Se observa que el manto se encontraba prácticamente colmatado al 100% ya que ha filtrado 2.880 m3 durante su funcionamiento.

La calidad del agua filtrada es de una turbiedad de 0,9 NTU, dicho parámetro fue medido hace 3 días por un agente externo ya que en la planta no se cuenta con el instrumental necesario para medirlo constantemente.

Por otra parte el ph del agua filtrada es de 6,8.

e) Desinfección y Alcalinización:

La desinfección se realiza con cloro, pero al realizar el pre-tratamiento con cloro dicha desinfección solo se realiza cuando no se logra un buen pre-tratamiento o cuando directamente no se realiza el pre-tratamiento químico.

Por otra parte la alcalinización se realiza con cal refinada, el agua luego de ser filtrada llega con un ph de 6,8 y luego de la colocación de la cal alcanza un ph de 7.

Ambos tratamientos se realizan en la cámara de reserva de salida de la planta. En la imagen N° 41 se muestra de forma ilustrativa una planilla con los parámetros calculados en cada fase:

PLANTA POTABILIZADORA DE PIRANÉ													CONTROL DE PROCESO		FECHA: 31 MAR/2018	
CANALON																
HORA	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00		
Caudal m3/h	320	332	336	317	293	275	271	211	213	213	216	212	211	202		
PH	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6		
AGUA CLARIFICADA																
Hora	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
PH	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7		
Turbiedad																
Cloro Resid.	0,50	2,00	1,50	1,50	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
AGUA INGRESO A CISTERNA																
Hora	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
PH	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7		
Turbiedad																
Cloro Resid.	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
AGUA DE IMPULSIÓN AL CENTRO																
Hora	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
PH	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7		
Turbiedad																
Cloro Resid.	1,00	1,50	1,50	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
CONSUMO DE PRODUCTOS QUIMICOS / HORA																
Hora	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
Dióxido de cloro	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76		
Sulfato Alum	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50		
Polimero	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30		
Carbon Act	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70		
Hip. De sodio	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600		
Cal	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600		
DISFICADORAS																
Dioxido de clo	N° 1				N° 2				Turno Mañana		Operador: <i>C. M. C. R.</i>		Operador:			
	Hs inicio	Hs Final	Turno Tarde		Operador:		Operador:									
Sulfato Alum									Turno Noche		Operador:		Operador:			
Polimero																
Carbon Act																
Hip. De sodio																

Imagen N° 41: Registro de parámetros de la Planta Potabilizadora Pirané..

9- Conclusiones:

Luego de las visitas y los estudios realizados en las distintas plantas se ha llegado a varias conclusiones generales:

- Se ha visto que todas las plantas visitadas poseen el mismo proceso de potabilización, pero cada una es diseñada y puesta en funcionamiento teniendo en cuenta sus recursos, su demanda y la calidad de agua cruda a tratar. Lo cual es un punto clave para la optimización y rendimiento de cada planta.
- La Planta Potabilizadora Suquia es la que cuenta con mayor caudal de producción y con procesos detallados y perfeccionados, mediante la incorporación de última tecnología. Esto se debe a que para seleccionar la cadena de tratamiento que hoy funciona en la planta, se construyó una planta piloto en donde se corrieron distintas alternativas de tratamiento, siendo la más efectiva la que hoy se encuentra en funcionamiento.
- En el diseño de los filtros se deben tener en cuenta varios aspectos, como el caudal de abastecimiento, espacio disponible, la calidad del agua decantada, el tipo de lavado que se va a realizar, entre otros.
- El mayor problema que se ha visto es cuando el agua cruda proviene de reservas o pantanos, ya que el agua se encuentra estancada y eso ayuda al crecimiento de algas y distintos organismos; los cuales favorecen el aumento del olor, sabor y color.
- Se han visto dos tipos de conformación de manto en los filtros (manto de arena y manto dual), y no se han observado diferencias notables en la calidad del agua filtrada con el uso de uno u otro. Esto valida que la elección del tipo de manto a elegir debe responder a una evaluación económica (los mantos duales son de mayor velocidad de filtración, requieren cajas más pequeñas pero la antracita es de mayor costo).
- Se debe poseer un total control sobre la carrera de los filtros, la cual depende de las características de agua que se está filtrando (calidad del proceso de clarificación), el caudal y el óptimo lavado de los filtros. La Planta Suquia en este aspecto cuenta con la tecnología y el personal necesario para que cada filtro funcione con su mejor carrera, y de ser necesario las carreras se van modificando constantemente.
- El principio de funcionamiento por excelencia es el de "presión hidrostática", sin embargo existen varias formas de dicha medición, por ejemplo tanto en la Planta Suquia, Los Molinos y Formosa es medida mediante sensores que indican la presión por encima del manto filtrante; la Planta Pirané cuenta con una regla colocada sobre una de las paredes del filtro, la cual indica la altura del agua por encima del manto. Ambos métodos son satisfactorios, solo que los primeros indican la evolución de la tecnología y ayudan a una lectura más precisa y rápida.
- El parámetro que se ha elegido para ser estudiada el agua filtrada es la turbiedad, y se ha llegado a las siguientes conclusiones:
 - o La turbiedad del agua cruda no debe ser tan baja, ya que dificulta la floculación de las partículas y es necesario colocar más coagulante para un buen proceso. Y en caso de no ser satisfactorio, los flóculos no decantan y se dirigen hacia los filtros.
 - o La turbiedad es un parámetro que no interfiere notablemente en la calidad del agua, pero sí en su estética. Y es una de las razones por la cual los usuarios no beberían un agua con una turbiedad elevada.
 - o Un agua con una turbiedad de 0,2 NTU es un agua que no contiene prácticamente partículas sólidas impuras.

o El rango de turbiedad del agua filtrada de las plantas estudiadas se encontraban entre 0,2 NTU (Planta Suquia y Los Molinos) y 1 NTU (Planta Formosa y Pirané).

- El lavado es una de las claves más importantes para el buen rendimiento de un filtro, y en función de lo observado se indica:
 - o El tiempo del lavado debe ser tal que, sea el suficiente para eliminar todas las impurezas del manto filtrante y a su vez que no sea lavado por más tiempo para no tener gastos de agua innecesarios.
 - o El lavado mixto (aire+agua) disminuye los tiempos y costos de lavado, ya que el aire mejora la remoción de las partículas del manto. La presión del aire infiltrado debe ser estudiada cuidadosamente para no romper el manto filtrante y para que pueda cumplir correctamente su función.
 - o Un buen lavado, teniendo en cuenta la turbiedad, se ve reflejado cuando la turbiedad del agua es próxima a la turbiedad del agua decantada. En ese punto el lavado podría ser terminado.
- En el rendimiento de la planta, el lavado de los filtros es fundamental ya que aproximadamente más del 50% de las pérdidas es por el uso del agua para el lavado de los filtros. Por lo tanto es importante contar con un tratamiento para dichas aguas de lavado; de las 4 plantas visitadas solo la Planta Suquia cuenta con un tratamiento adecuado y además un lavado mixto (agua+aire), lo que se ve reflejado en su rendimiento del 98% a diferencia de la Planta Formosa que posee un rendimiento del 95%.
- El funcionamiento del filtro, tanto su carrera como la calidad del agua filtrada, dependen de los procesos que la anteceden. Es fundamental una buena floculación para que las partículas de mayor tamaño decanten en los decantadores y no lleguen a los filtros y colmaten al manto en la superficie; lo que disminuye su carrera.
- Es fundamental tener control sobre la calidad de los parámetros, por lo menos a cada hora, tanto a la entrada como a la salida de los filtros. Dichos controles se realizan midiendo los diferentes parámetros, y de ser necesario modificar las distintas fases del proceso.
- Los filtros no requieren de grandes mantenimientos, si se los controla continuamente. Es importante estudiarlos durante el lavado para verificar que el manto filtrante no se rompa, que los sensores y válvulas funcionan correctamente, entre otros.

Aquí se han abordado conclusiones generales a los que se llegaron luego de los estudios realizados; ya que las conclusiones más particulares o detalladas se han comentado en cada instancia en particular.

10- Propuestas operativas para optimizar el funcionamiento:

Luego de haber visitado y estudiado las diferentes Plantas, anteriormente descritas, no es fácil poder llegar a una propuesta concreta que pueda mejorar y optimizar el funcionamiento de los filtros, ya que la Planta Potabilizadora Suquia cuenta con la última tecnología para su correcto funcionamiento.

Sin embargo después de estudiar detalladamente el proceso se recomendarán 3 (tres) propuestas operativas para que la planta las tenga en cuenta para una mejor optimización del funcionamiento.

✓ **Primer Propuesta:**

Los filtros viejos poseen un mejor rendimiento que los filtros nuevos, aunque el tiempo de las carreras sea igual, los filtros nuevos llegan a su colmatación más rápidamente, prácticamente en la mitad del tiempo que los filtros viejos. El lavado en dichos filtros tampoco es el óptimo, ya que el manto filtrante no vuelve a estar completamente limpio luego del lavado.

El motivo exacto es desconocido aun, por lo que se recomienda un estudio más profundo del filtro. Se recomienda un vaciado total de uno de los filtros y verificar que el manto filtrante se encuentre en las condiciones óptimas y optar por renovarlo de ser necesario; también se recomienda colocar caudalímetros de agua filtrada por filtro para realizar comparaciones y verificar el correcto funcionamiento de los sensores y de las válvulas.

✓ **Segunda Propuesta:**

Se ha observado que las mediciones de los parámetros mostrados en el programa son mayores que las que se indican a la salida del agua filtrada; esta diferencia que se revela es entre el % de apertura de la válvula de filtración y lo informado por Scada Topkapi.

Lo que se recomienda es calibrar correctamente los aparatos y de ser necesario modificar las lecturas en el programa. Ya que indican un mayor porcentaje de colmatación del manto, lo que induce a una menor carrera del filtro y mayores gastos.

✓ **Tercer Propuesta:**

Para un mayor control sobre el funcionamiento de cada filtro en particular, se recomienda la colocación de medidores a la salida de cada filtro, así se conocerá la calidad que está brindando cada uno y se podrá intervenir de forma individual en caso de que alguno no cumpla con algún requisito.

Esto trae aparejado grandes costos de inversión que debido a la excelente calidad de agua que brinda la planta no sería totalmente necesario ni urgente.

Bibliografía:

- o Aguas Cordobesas - "Tratamiento de Agua" (2007)
- o Aguas Cordobesas- "Practicas Recomendadas" (2008)
- o Degremont - "Manual Técnico del Agua" (1973)
- o Departamento de Ingeniería y Ciencias del Ambiente - "Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua" (1999)"