

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE FLOCULACIÓN EN LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE EL DORADO DE BOGOTÁ**

LEONARDO FABIO MATIZ CORREA



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ-COLOMBIA JULIO DE 2008**

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE FLOCULACIÓN EN LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE EL DORADO DE BOGOTÁ**

LEONARDO FABIO MATIZ CORREA

Proyecto de grado para optar al título de
INGENIERO AMBIENTAL

ASESOR
JAIME GUILLERMO PLAZAS TUTTLE
Ingeniero Civil, MSc



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ-COLOMBIA JULIO DE 2008**

AGRADECIMIENTOS

Quiero darle gracias al Ingeniero Jaime Plazas por ser mi tutor en la elaboración de mi proyecto de grado durante este semestre y por promover el interés en el estudio de la potabilización del agua, que es un problemática muy frecuente en el país y de la cual se tiene muy poco conocimiento.

Además quiero agradecer la colaboración del Ingeniero Mecánico Marco Millán, quien fue mi orientador directo durante todo el trabajo en la Planta El Dorado.

Así mismo agradecer al Ingeniero Químico Tulio Sánchez por sus aportes para el entendimiento del funcionamiento de la planta.

También quiero agradecer a las microbiólogas Liliana Reyes y Liliana Rey por sus aportes en temas relacionados con la microbiología del agua.

Además quiero agradecer a la ingeniera Diana Callejas por toda la paciencia que me tuvo al colaborar con la redacción y ortografía del documento.

Finalmente quiero agradecer a mis padres por todo el esfuerzo y sacrificio que han hecho por mí durante todo el tiempo que duro la carrera, por todas sus enseñanzas y toda su paciencia.

Contenido

RESUMEN.....	7
INTRODUCCIÓN	8
<i>Figura No 1 Distribución del agua sobre el planeta.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabla No 1 Disponibilidad de agua en el mundo por habitante y por regiones de 1950 a 20009</i>	<i>9</i>
<i>Grafica No 1 Tamaño de floc Vs tiempo de retención.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabla No 2 Comparación de coagulante con área de floc</i>	<i>10</i>
OBJETIVOS	12
Objetivo general	12
Objetivos específicos	12
MARCO TEORICO	13
Descripción de la PTAP EL Dorado.....	13
Punto de captación	13
<i>Foto 1. Embalse La Regadera</i>	<i>13</i>
<i>Tabla No 3. Características del Embalse La Regadera</i>	<i>14</i>
<i>Figura No 2. Tren de Tratamiento PTAP El Dorado.....</i>	<i>14</i>
Cámara de entrada	14
<i>Foto No 2. Cámara de Entrada</i>	<i>15</i>
<i>Foto No 3. Vertedero de Rebose.....</i>	<i>15</i>
Cascada	15
<i>Foto No 6. Reaireación</i>	<i>15</i>
<i>Foto No 7. Reaireación</i>	<i>15</i>
Mezcla Rápida	15
<i>Foto No 8. Canaleta Parshall.....</i>	<i>16</i>
Floculadores	16
<i>Figur No 3Mezclador hidráulico flujo horizontal</i>	<i>17</i>
<i>Figura No 5 Modelo de mezclador hidráulico de flujo horizontal.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura No 6 modelos de mezclador hidráulico de flujo vertical</i>	<i>17</i>
<i>Figura No 7 Floculador mecánico de eje vertical.....</i>	<i>18</i>
<i>FiguraNo 8 Floculador mecánico de eje horizontal</i>	<i>18</i>
<i>Foto No 10 floculador de eje horizontal PTAP El Dorado</i>	<i>19</i>
<i>Foto No 11 serie de 5 floculadores PATP El Dorado</i>	<i>19</i>
<i>Foto No 12 Floculador de 8 paletas PTAP</i>	<i>20</i>
<i>Foto No 14 Floculador de 4 paletas PTAP</i>	<i>20</i>
Sedimentación.	20

<i>Foto No 15 Sedimentadores de alta tasa</i>	21
Filtración	22
<i>Foto No 16 Tanques para filtración en línea</i>	22
<i>Foto No 17 Lechos de filtrado planta el dorado</i>	23
Desinfección	24
Planta Piloto	24
Importancia de una planta piloto	24
Descripción del funcionamiento de la Planta Piloto perteneciente a la Planta El Dorado de Bogotá	25
<i>Foto No 18 mecanismo de aplicación pre cal y coagulante</i>	25
<i>Foto No 20 Mezcla de coagulante</i>	25
<i>Foto No 21 Canaleta Parshall</i>	26
<i>Foto No 22 Floculador de 8 paletas</i>	26
<i>Foto No 24 Floculador de 4 paletas</i>	26
<i>Foto No 25 sedimentador de alta tasa</i>	27
<i>Foto No 27 Vista superior filtros</i>	27
<i>Foto No 29 consola de mando planta piloto</i>	28
Gradiente de velocidad para floculadores mecánicos	28
METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN	29
Documentación de procesos	29
<i>Foto No 30 Recipiente para la toma de muestras</i>	29
<i>Foto No 31. Muestreador de profundidad</i>	30
<i>Foto No 32. Muestreador de Profundidad listo</i>	30
Obtención del gradiente de floculación óptimo por medio de cambio en las áreas de las paletas.	30
Dosificación de químicos	30
Aforo de caudal	30
Operación de la planta piloto	30
Toma de muestra	30
Medida de turbiedad	31
Cambio de paletas	31
Prueba de la velocidad como parámetro de optimización del gradiente de velocidad	31
Cambios de velocidad	31
RESULTADOS	32
Documentación microscópica del tren de tratamiento	32
Cámara de entrada	32
<i>Foto No 33. Cristales</i>	32

Cascada	32
<i>Foto No 34. Scenedesmus opoliensis</i>	32
<i>Foto No 35. Chodelata Ciliata</i>	32
<i>Foto No 36. Straurastrum</i>	33
<i>Foto No 37. Scenedesmus acutus</i>	33
<i>Foto No 38 Ceratium</i>	33
<i>hirundinella</i>	33
<i>Foto No 39 Ceratium</i>	33
<i>hirundinella</i>	33
<i>Foto No 40. Cristales formados por sales de hierro disueltas</i>	34
Floculadores	34
<i>Foto No 41 distintos tipos de algas verdes</i>	34
<i>Fotos No 43 y 44 flocs filamentosos</i>	35
<i>Foto No 45 Flocs en fase dispersa</i>	35
<i>Foto No 46 floc normal</i>	36
<i>Fotos No 47, No 48 y No 49 cristales de sales disueltas</i>	36
<i>Fotos No 50 y No 51 Cristales de sulfato de aluminio</i>	37
<i>Foto No 52 dinoflagelados</i>	37
Filtración	38
<i>Foto No 53 cristales de hierro</i>	38
<i>Foto No 54 Daphnias</i>	38
Desinfección	39
Obtención del gradiente de velocidad optimo por medio del cambio en el área de las paletas de los floculadores.....	39
<i>Tabla No 3 Gradientes y turbiedades en el floculador 1</i>	39
<i>Tabla No 4 Áreas y turbiedades para el floculador 1</i>	39
<i>Grafica No 3 Turbiedad inicial y final en el floculador 1 para los 4 tipos de paletas</i>	40
<i>Tabla No 5 Gradientes y turbiedades floculador 2</i>	40
<i>Tabla No 6 Áreas y turbiedades para el floculador 2</i>	40
<i>Grafica No 4 Turbiedad inicial y final en el floculador 2 para los 4 tipos de paletas</i>	41
<i>Tabla No 7 Gradientes y turbiedades floculador 3</i>	41
<i>Tabla No 8 Áreas y turbiedades para el floculador 3</i>	41
<i>Grafica No 5 Turbiedad inicial y final en el floculador 3 para los 4 tipos de paletas</i>	42
<i>Tabla No 9 Gradientes y turbiedades floculador 3</i>	42
<i>Tabla No 10 Áreas y turbiedades para el floculador 4</i>	42

<i>Grafica No 6 Turbiedad inicial y final en el floculador 4 para los 4 tipos de paletas</i>	43
<i>Tabla No 11 Gradientes y turbiedades floculador 5</i>	43
<i>Tabla No 12 Áreas y turbiedades para el floculador 5</i>	43
<i>Grafica No 7 Turbiedad inicial y final en el floculador 5 para los 4 tipos de paletas</i>	44
<i>Tabla No 13 Comparación de turbiedades iniciales. Configuración original Vs configuración optima</i>	44
<i>Grafica No 8 comparación de turbiedad inicial, configuración original de paletas Vs configuración optima de paletas</i>	44
<i>Tabla No 14 Comparación de turbiedades finales. Configuración original Vs configuración optima</i>	45
<i>Grafica No 9 comparación de turbiedad inicial, configuración original de paletas Vs configuración optima de paletas</i>	45
<i>Grafica No 10 Cambio del gradiente con el paso por los floculadores de la planta piloto</i>	46
Cambios en la velocidad de mezcla	46
<i>Tabla No 15 Gradientes y turbiedades velocidad 1</i>	46
<i>Tabla No 16 Gradientes, potencias y turbiedades velocidad 2</i>	46
<i>Tabla No 17 Gradientes, potencias y turbiedades velocidad 3</i>	47
<i>DISCUSIÓN</i>	48
<i>Tabla No 18 Gradientes y turbiedades para el proceso actual (en planta piloto)</i>	48
<i>Tabla No 19 Gradientes y turbiedades resultado experimental (planta piloto)</i>	48
<i>Tabla No 20 Porcentajes de optimización para cada floculador respecto a turbiedades. (planta piloto)</i>	48
<i>Tabla No 21 Gradientes y turbiedades para una velocidad de 8.5 rev/min</i>	49
<i>Tabla No 22 Gradientes y turbiedades para una velocidad de 1.75 rev/min</i>	49
<i>CONCLUSIONES</i>	50
<i>RECOMENDACIONES</i>	51
<i>BIBLIOGRAFIA</i>	52

RESUMEN

La Planta de Tratamiento de Agua Potable El Dorado, es una de las tres principales PTAPS que hace parte del sistema de abastecimiento y distribución de agua potable para la ciudad de Bogotá, en ella se realizó un estudio para optimizar el proceso de floculación, este estudio se realizó a nivel de planta piloto, con el fin de obtener un agua resultante de mejor calidad con respecto a la turbiedad.

Dentro de este proyecto también se realizó un seguimiento microscópico al agua de forma tal que durante el recorrido de la misma por el tren de tratamiento de la PTAP El Dorado se obtuvieron fotografías que fueron revisadas para con esto lograr una descripción microscópica del agua a lo largo del tratamiento.

Para la primera parte de este trabajo se utilizaron muestras obtenidas en cada uno de los procesos del tren de tratamiento que fueron analizadas bajo el microscopio, utilizando para esto fotografías las cuales permiten ver con más detalle lo que se encontró bajo el microscopio.

Para la optimización del proceso, primero se hicieron pruebas cambiando el área de las paletas de los floculadores pero manteniendo la velocidad original del sistema, posteriormente con el área de las paletas optimizada se realizaron ensayos con diferentes velocidades de floculación. El punto de referencia para obtener la optimización fue la turbiedad del agua.

Uno de los resultados más importantes que se obtuvo al culminar los experimentos está relacionado con el área de las paletas dentro de los floculadores, ya que al aumentar el área total de las mismas se presentó una reducción en la turbiedad del agua aproximadamente de un 5% en comparación con la turbiedad obtenida con la configuración inicial de la planta piloto, a la salida de este proceso.

Los experimentos realizados en planta piloto presentan de una forma más real lo que sucede en la planta de tratamiento, por esta razón deberían realizarse con mayor frecuencia para obtener un punto de referencia para la dosificación de floculante, ya que el Test de Jarras es una aproximación a nivel de laboratorio que tiene características de proceso ideal de floculación y con él se obtendrán unos resultados menos exactos para aplicar en la planta real.

INTRODUCCIÓN

El agua cubre el 71% de la superficie de la tierra, la cual está distribuida en su mayoría entre los océanos y mares, y una menor porción entre ríos, lagos, subsuelo, glaciares, etc ver Figura No 1. Esta última porción es agua apta para consumo humano que representa un 1.5% del total. Sin embargo de este 1.5% tan solo el 0.295% es agua dulce superficial de fácil acceso para el hombre, con lo cual el agua constituye un recurso natural limitante para el ser humano.

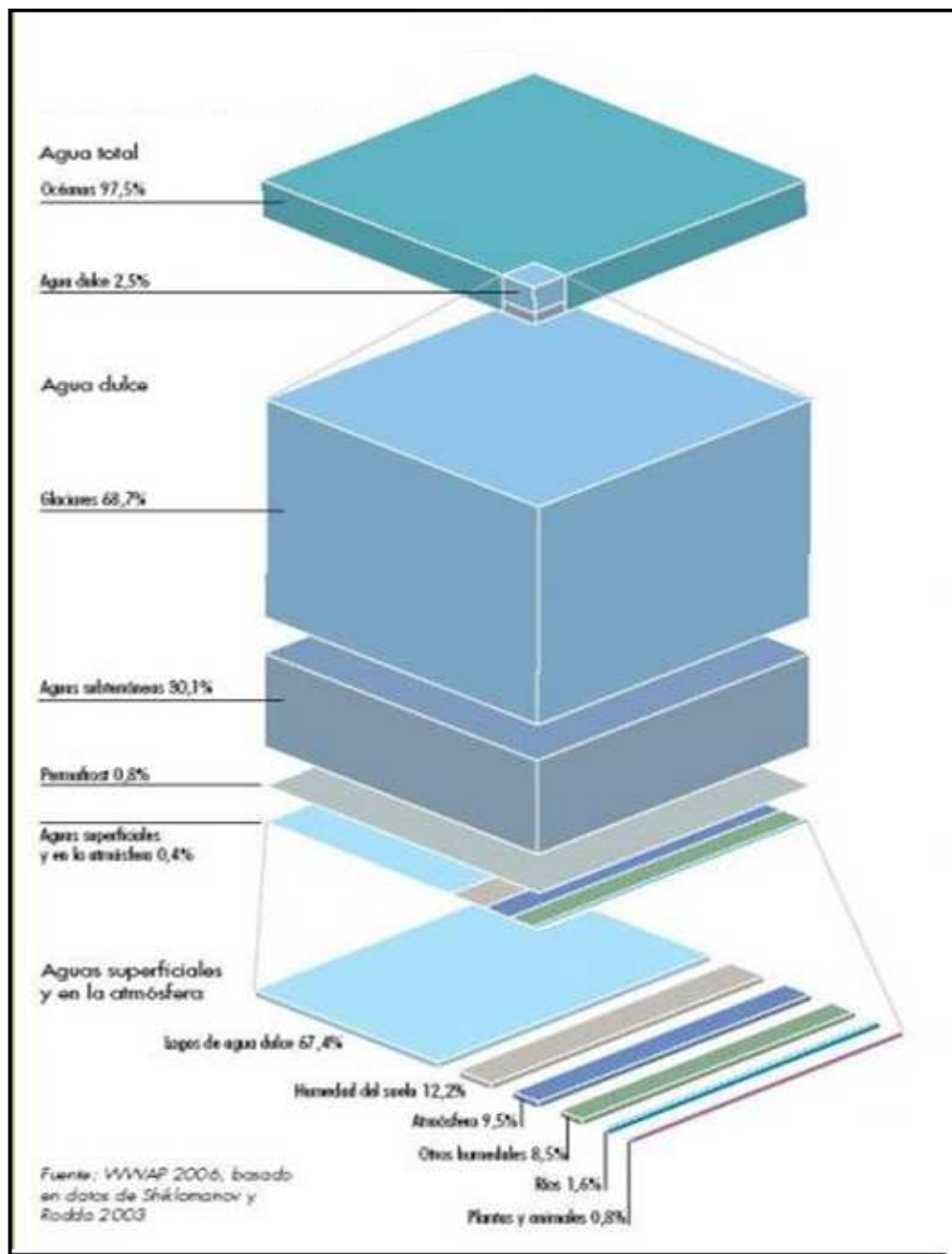


Figura No 1 Distribución del agua sobre el planeta ^[14]

Adicional a la baja disponibilidad de agua potable, se suma la problemática de la desigualdad en la distribución en las diferentes regiones del mundo. Por ejemplo en países como Estados Unidos, la dotación es de 250 a 400 litros de agua/habitante * día, por el contrario en Somalia la dotación no supera los 10 Litros de agua/habitante día^[12]. En el *Tabla No 1* se presentan algunas cifras acerca de la disponibilidad del agua en diferentes regiones.

Región	1950	1960	1970	1980	2000
	<i>(miles de m³)</i>				
Africa	20,6	16,5	12,7	9,4	5,1
Asia	9,6	7,9	6,1	5,1	3,3
América Latina	105,0	80,2	61,7	48,8	28,3
Europa	5,9	5,4	4,9	4,4	4,1
América del Norte	37,2	30,2	25,2	21,3	17,5

Tabla No 1 Disponibilidad de agua en el mundo por habitante y por regiones de 1950 a 2000 ^[15]

Como se puede observar en el cuadro anterior, en Latinoamérica la disponibilidad de agua por habitante es mucho mayor que en África o Asia, esto dado gracias a su posición geográfica, su topografía y su régimen climático.

Sin embargo, en un país como Colombia, la distribución desigual del agua sigue siendo parte del problema, pero es más preocupante aun la baja calidad del agua que es entregada a los usuarios de los sistemas de acueducto del país.

Según el estudio “*Diagnostico sobre la calidad el agua para el consumo humano*” publicado el 6 de Octubre de 2006 por la Defensoría del Pueblo, de un total de 955 municipios analizados en este estudio, solo 82 municipios, que representan tan solo el 8.6% del total estudiado, cumplen con el decreto 475 / 98 (Capítulo III – Normas organolépticas, físico-químicas y microbiológicas de la calidad del agua potable) con el cual se estipulan los parámetros del agua para consumo humano.

Dentro de ese estudio se encontró que en departamentos como Amazonas, Arauca, Bolívar, Caquetá, Casanare, Cesar, Guainía, Guaviare, La Guajira, Meta, Nariño, Putumayo, Risaralda, San Andrés, Santander, Vaupés y Vichada, no hay abastecimiento de agua potable en ninguno de los municipios, lo que muestra la desigualdad en cuanto a tratamiento y distribución del agua potable que existe en el país.

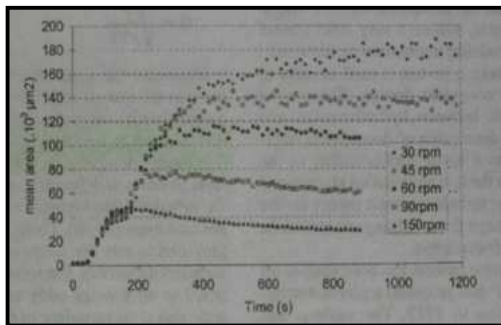
Esta falta de acceso al agua potable, fuerza al ser humano a acudir a medios de potabilización para poder satisfacer sus propias necesidades de agua potable, para esto se utilizan las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAPS).

En el caso particular de la ciudad de Bogotá, se tienen tres plantas principales para el tratamiento de agua potable, y estas son: Tibitóc, Wiesner y El Dorado, la cuales tienen en conjunto la cobertura del 100% de los barrios legales de la ciudad.

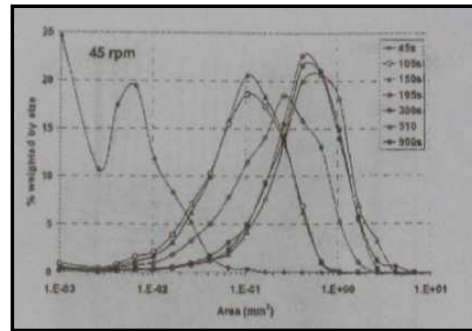
Estas plantas funcionan con el tren de tratamiento convencional, de forma que el agua pasa por todos los procesos de tratamiento, resultando en un agua apta para el consumo humano, dentro de estos procesos esta el proceso de floculación, que será el proceso que se estudiara a profundidad en este trabajo.

Dentro de los estudios que se han realizado anteriormente respecto al proceso de optimización de la floculación, se encontraron las investigaciones hechas por D. BOUYER, A. LINE, A. COKX, y Z. DO-QUANG en el año 2001 ^[10]. En este estudio la metodología empleada consistió en medir el tamaño del floc dentro del proceso de mezcla lenta en el ensayo de jarras por medio de un sensor laser, una cámara y un procesador de imagen, con el cual se obtuvo el cambio en el tamaño del floc a lo largo del proceso de mezcla. En este caso las variables que se tuvieron en cuenta fueron el tiempo de mezcla y la velocidad de agitación.

En las graficas No 1 y No 2 se ven los resultados de dicho estudio, en los que se encontró que la velocidad optima de rotación de las paletas en la mezcla lenta, y el tiempo de retención optimo son respectivamente 45 rpm y 17 min.



Grafica No 1 Tamaño de floc Vs tiempo de retención



Grafica 2 Área de floc a 45 rev/min

Por otra parte Kevin McCurdy, Kenneth Carlson y Dean Gregory en Octubre del año 2003 ^[11]. En este estudio la metodología utilizada consistió en cambiar los tipos de coagulante utilizados, para encontrar la diferencia en tamaño de floc y potencial z entre los tres tipos de coagulante utilizados Sulfato de Aluminio, PACL (Cloruro de Poli-Aluminio) y una combinación de los dos anteriores, manteniendo tanto la velocidad de mezcla como el tiempo de retención hidráulica constantes.

En la tabla No 2 se presentan los resultados del experimento, en los que se observa como el Alum (conocido en español como sulfato de aluminio) es más efectivo para lograr tamaños mayores en los flocs en formación, que los otros dos tipos de coagulantes PACL (polyaluminium chloride) y PACL/alum, que es una combinación de sulfato de aluminio y cloruro de poli-aluminio.

Treatment	Area (μm^2)	Major Axis (μm)	d_2^a	r^2
Alum-coagulated	134,26	536	$1,857 \pm 0,187$	$0,755 \pm 0,133$
PACL-coagulated	68,256	381	$1,607 \pm 0,145$	$0,805 \pm 0,108$
PACL/alum-coagulated	101,158	469	$1,575 \pm 0,101$	$0,890 \pm 0,081$

Tabla No 2 Comparación de coagulante con área de floc.

Al comparar estos estudios con el presente trabajo se observa que en los tres el objetivo propuesto es el mismo, la optimización del proceso de floculación. Sin embargo las metodologías empleadas no fueron las mismas ya que en los estudios realizados por estos autores se utilizo el Test de Jarras lo cual simula una situación ideal, contrario a las pruebas realizadas con el presente estudio donde los ensayos se realizaron en un planta piloto en tiempo real y por lo tanto obtuvieron resultados más acordes con el funcionamiento real de la planta.

Sin embargo estos estudios permiten abrir la posibilidad de realizar pruebas en la planta piloto variando otros parámetros como lo son el coagulante y la velocidad, ya sea de forma independiente o simultánea.

El presente trabajo tiene como objetivo optimizar el proceso de floculación para la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) El Dorado, localizada en Bogotá. Este trabajo surge de la necesidad de documentar este proceso dentro de la operación de la planta ya que hasta el momento no se cuenta con la información suficiente para poder optimizarlo, por ende tampoco se han realizado las pruebas necesarias para este objetivo. De esta forma este trabajo busca la recopilación de información para plantear una metodología que permita obtener un parámetro de optimización del proceso floculación y una vez evaluado este parámetro definir si este proceso está o no optimizado dentro del proceso de tratamiento.

OBJETIVOS

Objetivo general

Optimizar el proceso de floculación por medio del cambio en el área de las paletas de los floculadores, teniendo como parámetro de referencia la turbiedad.

Objetivos específicos

- Corroborar que la turbiedad es un parámetro que puede utilizarse para medir la efectividad del proceso de floculación.
- Evaluar por medio de pruebas en la planta piloto, si el proceso de floculación que se está practicando en la Planta El Dorado es óptimo.
- Usando los resultados de los experimentos realizados como punto de referencia frente al proceso de floculación, realizar recomendaciones técnicas para lograr la optimización de dicho proceso.
- Obtener el gradiente óptimo para el proceso de floculación por medio de experimentos en la planta piloto.
- Mostrar por medio de variaciones importantes en la velocidad de mezcla, que la velocidad es un parámetro que puede utilizarse para optimizar el proceso de floculación.

MARCO TEORICO

Descripción de la PTAP EL Dorado ^[16]

Punto de captación

La Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) El Dorado pertenece a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), está ubicada en la vía que conduce de Bogotá a Villavicencio en la localidad de Usme al sur de la Bogotá.

La PTAP trata agua proveniente de tres fuentes naturales. La primera fuente es el Embalse los Tunjos ubicado en el Páramo de Sumapaz en la cota 3850 m.s.n.m, de este embalse se capta 1 m³/s . La segunda fuente es el Embalse de Chizacá éste se ubica en (3765 m.s.n.m), del cual se captan 6 m³/s , la tercera fuente es el Embalse de La Regadera ubicado en (3545 m.s.n.m), (ver Foto 1) del cual se captan 4 m³/s.



Foto 1. Embalse La Regadera^[1]

Al Embalse La Regadera llega el agua captada de los Embalse de los Tunjos y Chizacá, con lo cual el Embalse de La Regadera es el punto de captación final. Desde allí el agua es transportada en una tubería de 34 pulgadas de diámetro y una distancia de 10 Km. hasta la el punto de derivación y empalme. Desde este último punto el agua finalmente es transportada en una tuberías de 39 pulgadas de diámetro y una distancia de 1.1 Km. Llegando finalmente a la PTAP.

La PTAP El Dorado abastece de agua potable a usuarios que viven por encima de la cota 2800 m.s.n.m, a los usuarios que viven en la localidad 5 de Usme sobre los 2850 m.s.n.m, y usuarios que habitan en la margen derecha del Río Tunjuelito.

En la Tabla No 3 se presentan las características del Embalse de La regadera, punto directo donde se capta el agua que es tratada en la planta El Dorado.



Foto No 2. Cámara de Entrada Foto No 3. Vertedero de Rebose

Cascada

En este sitio se genera la reaireación del agua, por medio de una cascada formada por un vertedero semicircular (ver Foto No 6). Esta reaireación ayuda a saturar el agua de oxígeno, generando la precipitación de algunos metales pesados que están en disolución con el agua, además de oxidar el hierro presente en el agua para eliminarlo. En este punto es aplicada la “pre cal”, en el caso de que el pH del agua sea muy ácido (ver Foto No 7).



Foto No 6. Reaireación Foto No 7. Reaireación

Mezcla Rápida

En este punto el agua sale de la cascada y pasa por una Canaleta Parshal, (ver Foto No 8), la cual tiene 1.94 m de ancho en su entrada, posteriormente este ancho se reduce a 1.2 m, generando un resalto hidráulico, el cual es aprovechado para la mezcla rápida del coagulante (Sulfato de Aluminio). Al final de la canaleta el ancho de ésta a la salida vuelve a aumentar hasta 1.52m.



Foto No 8. Canaleta Parshall

Este proceso de mezcla rápida se hace con el objetivo de que el coagulante se mezcle de forma efectiva con el agua. Al salir de la canaleta Parshall, el agua es conducida hacia los floculadores por dos canales, que tienen 1.2 m de ancho, 36.75 m de longitud, y una velocidad constante de 1 m/s, este recorrido completa el proceso de mezcla rápida generando microflocs.

Floculadores

La floculación es el proceso mediante el cual las partículas son aglutinadas, de forma tal que su tamaño y su densidad aumentan para que puedan ser retiradas del agua más fácilmente en un proceso posterior llamado sedimentación. Hay dos tipos de floculación que son: floculación pericinetica y floculación ortocinetica.

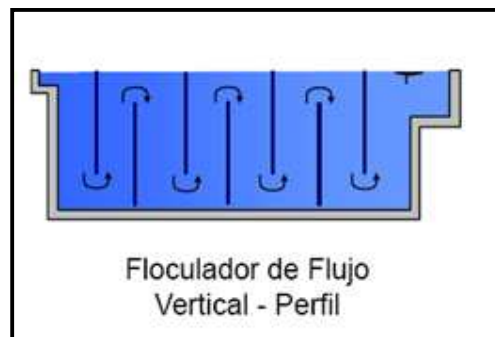
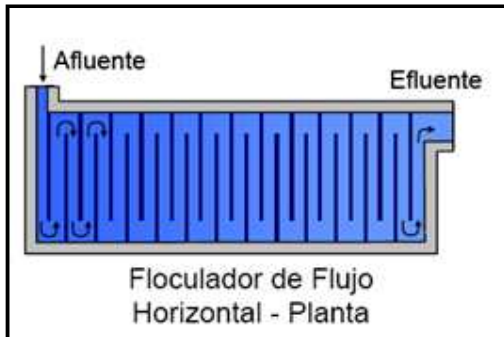
La floculación pericinetica se presenta en partículas pequeñas (tamaño menor a $1\ \mu\text{m}$), ya que este tipo de floculación esta dado por el movimiento natural de las partículas del agua (difusión de partícula en el agua), que ocasiona movimiento en las partículas por cambios en la energía térmica (energía interior del agua); Este movimiento es conocido como el movimiento Browniano.

Al igual que la floculación pericinetica la floculación ortocinetica se presenta por las colisiones de partículas debido al movimiento del agua, pero en ésta última el movimiento en el agua es generado por una energía externa, producida por dos tipos de mezcladores, hidráulicos o mecánicos.

Mezcladores hidráulicos: Estos generan una mezcla lenta del agua ocasionada por el movimiento propio de ésta, manejando así una baja velocidad en comparación con estructuras de mezcla rápida como lo es una canaleta Parshall. De esta forma los mezcladores hidráulicos de tabiques horizontales o verticales (*ver Figuras No 3, No 4, No 5 y No 6*), hacen que el agua fluya muy lentamente a través de los extremos de los tabiques, de forma tal que este movimiento proporciona la velocidad y la mezcla suficientes para que tanto las partículas pequeñas como las grandes, choquen unas con otras y se puedan formar los flocs. Para este caso, en particular cuando se hace el diseño, se debe asegurar la velocidad suficiente para que el agua fluya y no se quede estática, ya que si esto ocurre las partículas podrían sedimentarse, y colapsaría el sistema de floculación.

Teniendo en cuenta el problema anteriormente nombrado, es más común utilizar mezcladores de flujo horizontal ya que en estos se genera una menor acumulación de lodos en el fondo en

comparación con los mezcladores de flujo vertical. En el diseño también se debe asegurar que la velocidad no sea muy alta, ya que con esta los flocs pueden romperse y la eficiencia de la floculación se vería reducida al igual que la efectividad del proceso de clarificación del agua también.



Figur No 3 Mezclador hidráulico flujo horizontal^[3] Figura No 4 Mezclador hidráulico de flujo vertical^[3]

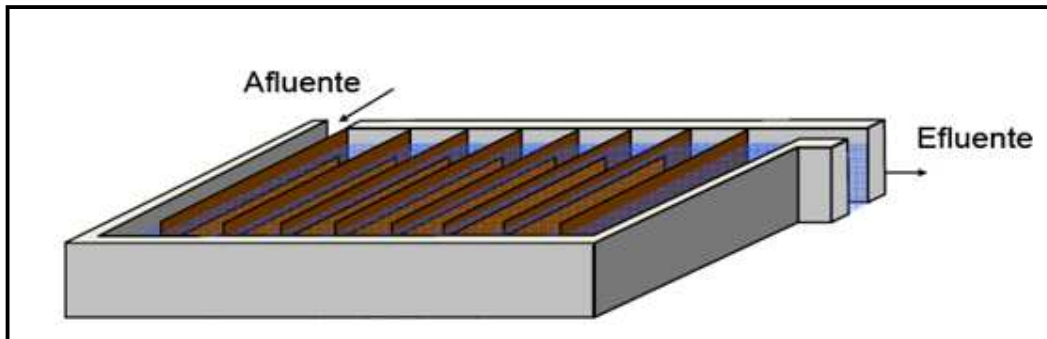


Figura No 5 Modelo de mezclador hidráulico de flujo horizontal ^[3]

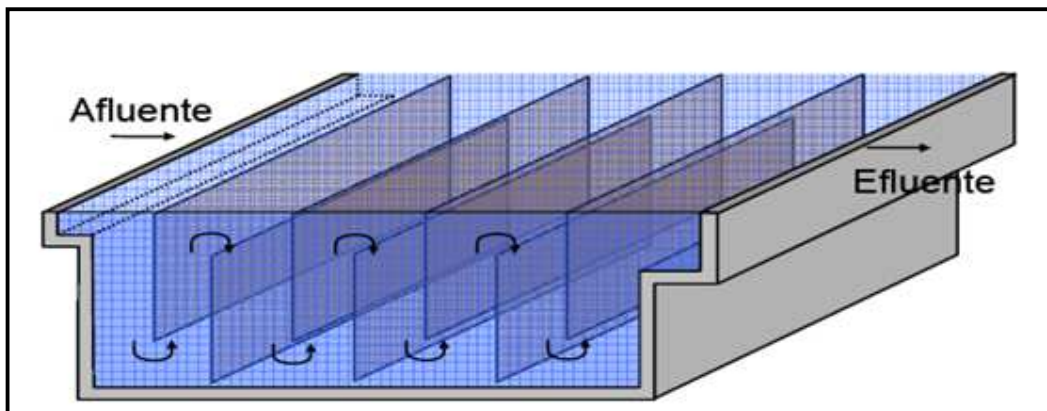


Figura No 6 modelos de mezclador hidráulico de flujo vertical ^[3]

Mezcladores mecánicos: Los mezcladores mecánicos le generan movimiento al agua por medio de energía mecánica. Ésta es inducida por un motor hacia un eje que puede ser vertical u horizontal, el cual contiene unas paletas de madera, las cuales le generan al agua un gradiente de movimiento, lo que hace que con cada cambio de floculador, las partículas tomen mayor tamaño, y se puedan remover más fácilmente en el paso posterior.^[3]

Floculadores mecánicos con eje vertical: Los floculadores mecánicos de eje vertical (*ver figura No 7*), son tanques con ejes que lo cruzan de forma vertical, los cuales le generan al agua un movimiento dado por la potencia que es inducida por medio de la combinación del motor con el

eje y las paletas. Este tipo de floculador es utilizado cuando el agua sale de la floculación directamente hacia la filtración, ya que este tipo de floculadores sirven a su vez como sedimentadores. [3]

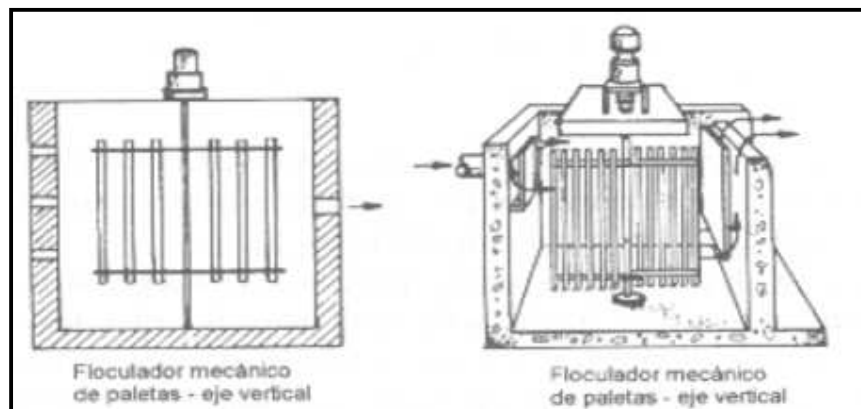
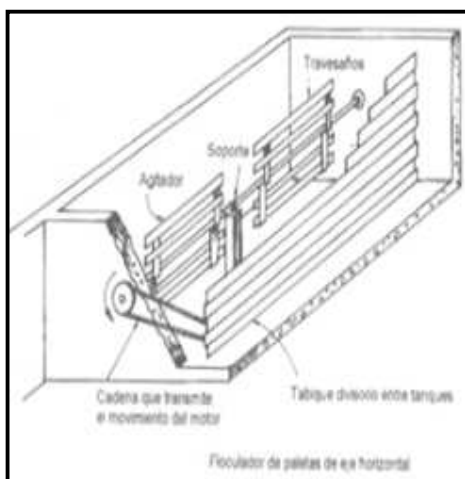


Figura No 7 Floculador mecánico de eje vertical [3]

Floculadores mecánicos de eje horizontal: Estos floculadores son los mas utilizados para el proceso de floculación. Consisten en una serie de tanques que tienen un eje horizontal (ver figura No 8 y foto No 9), en el cual van unas paletas de madera, este eje gira para darle movimiento a las paletas, las cuales a su vez mueven el agua, de forma tal que se genera un gradiente de velocidad entre un tanque y otro. Este cambio de gradiente permite que gradualmente las partículas choquen unas con otras. Éstos choques facilitan la aglomeración de las partículas, lo que hace que el proceso sea cada vez más eficiente. [3]



FiguraNo 8 Floculador mecánico de eje horizontal[3] **FotoN 9 Floculador mecánico de eje horizontal**[3]

La PTAP El Dorado utiliza el medio de floculación mecánica con floculadores de eje horizontal (ver foto No 10). Esta planta cuenta con 5 floculadores en serie, cada uno de éstos tiene un volumen de 134.95 m³, con unas dimensiones de 5.3 m de ancho, 5.25 m de largo, y una profundidad efectiva de 4.85 m. De esta forma el volumen total es de 674.75 m³. El sistema de floculación de la planta, está configurado de tal forma que el gradiente de velocidad entre cada floculador que sigue en la secuencia, es menor (Regla que se ha aprendido de la teoría de floculación, para que dicho proceso sea más eficiente) y de esta forma al pasar de un floculador a otro, las partículas se aglomeran más fácilmente ya que siguen el movimiento browniano el

cual genera los choques se mantiene, pero con una menor intensidad evitando así que los flocs se rompan.



Foto No 10 floculador de eje horizontal PTAP El Dorado

La planta tiene una configuración de gradientes descendientes la cual se presenta en los cinco tanques (ver foto No 11) con una velocidad constante de 2 rpm y una configuración de paletas de 0.15m de ancho * 4.60 m de largo distribuida así: 8 paletas en el floculador 1 (ver foto No 12), con un gradiente de 22.77 S^{-1} , el segundo y tercer floculador, tienen 6 paletas (iguales a las de el primer floculador) (ver foto No 13) generando un gradiente de 19.96 S^{-1} y para finalizar, los floculadores cuarto y quinto, tienen una configuración de 4 paletas (ver foto No 14), generando un gradiente de 18.95 S^{-1} .



Foto No 11 serie de 5 floculadores PATP El Dorado



Foto No 12 Floculador de 8 paletas PTAP

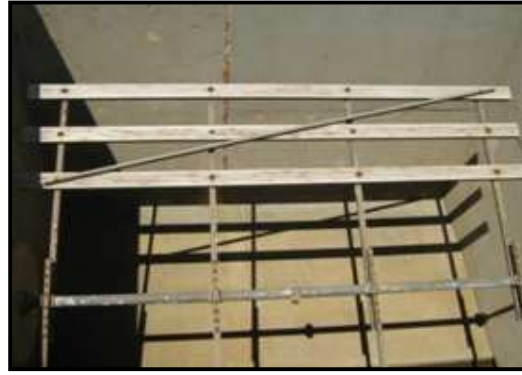


Foto No 13 Floculador de 6 paletas PTAP



Foto No 14 Floculador de 4 paletas PTAP

En el proceso de floculación se pueden encontrar 3 formas de flocs que son formaciones de floc normal (ver figura No 9), flocs en fase dispersa (ver figura No 10) y flocs filamentosos (ver figura No 11)

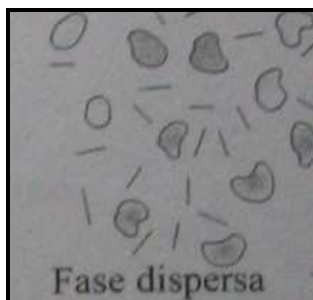
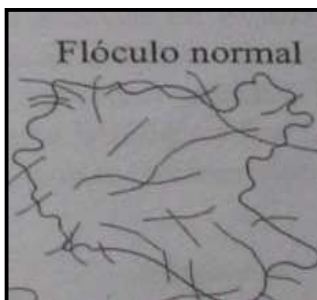


Figura No 9. Floc Normal ^[4] **Figura No 10. Floc en fase dispersa** ^[4] **Figura No 11. Floc filamentososo** ^[4]

Sedimentación.

La sedimentación es el proceso mediante el cual se retiran los flocs formados en el proceso anterior; en el proceso de sedimentación clásico se utilizan varios tanques en paralelo, en los cuales se deja el agua en reposo para que los flocs formados se decanten, esto ocurre por el aumento del peso y la densidad de los mismos, causado por la aglomeración de partículas visibles y no visibles debido a la acción del Sulfato de Aluminio.

El proceso anteriormente descrito es un sistema tradicional de sedimentación, el cual presenta un problema importante. Este problema está relacionado con el requerimiento de áreas muy grandes para los sedimentadores ya que el tiempo de retención hidráulico en cada tanque es muy largo, hasta 420 min^[3]. Cuando el agua completa este tiempo ya puede ser enviada al proceso de filtración, por lo cual se deben tener varios tanques de forma tal que cuando al último este ingresando el agua de los floculadores en el primer tanque ya se debe estar finalizando la sedimentación.

Una forma de evitar este problema es tratar un caudal mucho menor, de forma tal que los tanques se llenen muy lentamente y así el primer tanque tendría el tiempo suficiente para que se complete el proceso y el agua pueda ser evacuada a los filtros y para que este tanque nuevamente comience a llenarse, mientras se desocupa el siguiente. Sin embargo el proceso realizado de esta forma no es muy efectivo ya que podría generar problemas de distribución del agua.

Para solucionar este problema, se crearon los sedimentadores de alta tasa. Este sistema tiene varios tanques a los que se les implementan una serie de placas planas, paralelas, inclinadas, lo que mejora considerablemente el área de contacto entre el agua y el sedimentador. De esta forma los flocs se quedan en las placas inclinadas y poco a poco van descendiendo por las placas, lo que facilita la recolección de lodos.

En el caso de los sedimentadores de la planta El Dorado (*ver foto No 15*), los tanques tienen placas inclinadas a 60°, de forma que el agua debe ascender lentamente por los tanques y ser evacuada al siguiente proceso por la parte superior de éstos. En este caso se incrementa la efectividad del proceso de forma que aumenta la carga superficial entre 4 y 10 veces y reduce el tiempo en un orden de magnitud pasando de 420 min en el sedimentador tradicional a 10 minutos en un sedimentador de alta tasa.



Foto No 15 Sedimentadores de alta tasa ^[1]

Filtración.

La filtración es el proceso mediante el cual se obtiene agua de muy buena calidad, gracias al paso de la ésta por un medio poroso, donde todas las partículas que no pudieron ser removidas en los pasos anteriores, son retenidas por el medio, generando como resultado un agua clarificada casi lista para el consumo humano.

En este proceso se separan de forma efectiva todas las partículas sólidas que hay en ese momento en el agua. Hasta este punto del proceso se ha removido aproximadamente el 90% de los sólidos suspendidos, con el proceso de filtración el agua resultante tiene solamente el 0.5% de sólidos suspendidos, logrando con esto una retención de sólidos suspendidos del 99.5%, lo que genera un efluente a la salida de éste proceso con un alto nivel de calidad.

Existen tres tipos de filtración que pueden ser usados para tener el mismo efecto de clarificación sobre el agua que dependen solamente de los procesos aplicados anteriormente, y estos son:

Filtración convencional: Este tipo de filtración se usa para aguas de calidad variable, y se usa después de tener coagulación, floculación y sedimentación, generando en total una retención de sólidos suspendidos máxima del 99.5%.

Filtración directa: En este caso puede presentarse la coagulación y floculación previamente al proceso de filtración, pero para realizar la filtración de esta forma, la turbiedad en el agua debe ser menor a 15 UTN.

Filtración en línea: En este caso se utilizan unos tanques especiales en los que se agregan los químicos para que la coagulación y la floculación ocurran directamente dentro de los tanques de filtración. Se usan tanques especiales (ver foto No 16), ya que dentro de estos se presentan altas presiones para que se lleve a cabo el proceso.

El proceso realizado de esta forma es eficiente, sin embargo la turbiedad es una restricción que se debe tener en cuenta, de lo contrario se puede perder eficiencia en el proceso, ya que este es efectivo para turbiedades intermedias, y no extremas, ni muy altas ni muy bajas.



Foto No 16 Tanques para filtración en línea ^[3]

Hay tres mecanismos de filtración, estos son:

Filtración por cribado: En este tipo de filtración, el agua pasa por un medio poroso, en el que los poros son más pequeños que el material que se quiere remover. En este tipo de filtro, cuanto mayor ha sido el tiempo de filtración, los poros se van saturando, de forma que dejan pasar cada vez partículas de menor tamaño, con lo cual se puede llegar a retener material más pequeño del que en realidad se quiere. La filtración dada de esta forma, es una filtración Física. [3]

Filtración por Adsorción: Esta filtración es de tipo químico, que se da por la acumulación de líquidos, gases o partículas disueltas en la superficie de un medio. Ésta tiene en cuenta algunas reacciones químicas que ocurren entre el material usado para el filtrado y los tipos de partículas que hay en el agua. Además de estos enlaces químicos, en este tipo de filtración también existen interacciones físicas a micro escala dadas por las fuerzas electroestáticas y las fuerzas de Van der Waals, las cuales son fuerzas físicas causadas por la atracción generada entre las partículas del material y del agua, siendo este un método muy efectivo para remoción de sólidos suspendidos en el proceso de clarificación y purificación del agua dado en una planta de tratamiento de agua potable. [3]

Filtración por crecimiento biológico: En este caso en el material filtrante crecen distintos tipos de bacterias que consumen materia orgánica, de forma que hay degradación de las partículas en el agua por procesos biológicos. Este tipo de filtros no son muy utilizados en plantas de tratamiento de agua potable ya que el agua tiene que pasar muy lentamente por éstos para que la materia orgánica sea consumida, lo cual no ocurre en PTAPs. [3]

Este tipo de filtros son utilizados en su mayoría en el tratamiento de aguas residuales, no solo por el tiempo que debe durar el agua en el filtro sino también porque el agua que llega a los filtros de las PTAPs, tiene muy poca o ningún tipo de materia orgánica.[3]

En el caso particular de la PTAP El Dorado se está utilizando una filtración convencional, para la cual el agua ha pasado previamente por un tren de tratamiento convencional, antes de pasar a los filtros (ver foto No 17).

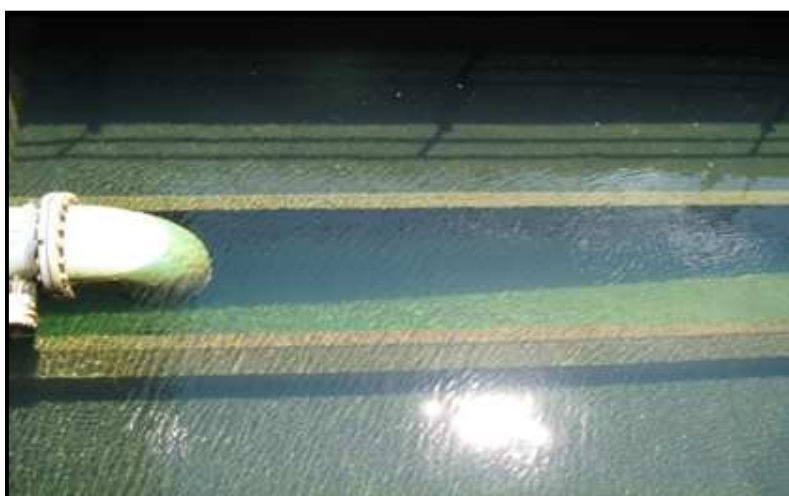


Foto No 17 Lechos de filtrado planta el dorado

En la *Foto No 17* se puede observar el lecho filtrante de antracita el cual es usado en los filtros de la planta El Dorado.

Desinfección.

En este proceso se remueven, destruyen o inactivan los microorganismos patógenos por medio de la adición una sustancia química u otro proceso.

Este es un proceso indispensable para el caso de las PTAP's, ya que la norma así lo exige y a que el agua puede contener microorganismos patógenos los cuales constituyen gran riesgo para la salud, por esto este proceso es obligatorio para el tratamiento de agua potable

Hay cuatro tipos de agentes que se pueden usar para desinfección y estos son:

Agentes químicos: En este caso se usan agentes químicos como el Cloro, Yodo o Bromo, los cuales actúan sobre los microorganismos patógenos destruyéndolos, ya que inhiben la actividad enzimática. [3]

Agentes físicos: En este caso se usan propiedades físicas como el calor, la luz y las ondas de sonido los cuales afectan la naturaleza coloidal del protoplasma de los microorganismos (en el caso de el calor o la acides) o generan alteraciones en el ADN o ARN de los microorganismos, inhibiendo su capacidad de replicación (en el caso de la luz, por el factor UV). [3]

Agentes mecanicos: En este caso se usan distintos tipos de filtros con microporos, por los cuales los microorganismos no pueden pasar y de esa forma son removidos del agua. [3]

Radiacion: La radiación electromagnética o acústica puede causar alteraciones tanto en las paredes de los microorganismos como en el protoplasma de los mismos, causando inhibición o alteración en la permeabilidad de la pared de los microorganismos, ayudando a su destrucción.[3]

Para este caso en particular, se usa cloro ya que hasta ahora es uno de los químicos de desinfección más efectivos, más económicos y que además genera un residual que mantiene la desinfección a lo largo del sistema de distribución. Por lo que la desinfección se mantiene aun después de que el agua sale de la planta y llega a los usuarios.

Adicionalmente debido a la toxicidad del desinfectante, es necesario hacer un seguimiento de la concentración del químico en varios puntos de la red y de esta forma evitar problemas de salud pública ya sea por exceso o defecto del desinfectante.

Planta Piloto [16]

Importancia de una planta piloto

Una planta piloto es un prototipo a escala de la planta de tratamiento real que será utilizada en una ciudad o municipio. Este tipo de prototipos son muy útiles, ya que en ellos se pueden hacer pruebas en tiempo real, obteniendo resultados más aproximados a la realidad en comparación con los resultados que se obtienen en laboratorio. En laboratorio los experimentos son realizados en situaciones ideales por lo cual no se tienen en cuenta factores como, el

movimiento no uniforme en el agua, el cual se da por el recorrido que tiene esta en el paso de la mezcla rápida a la mezcla lenta. De esta forma una planta piloto sirve para realizar diferentes experimentos, con los cuales se podrán obtener resultados útiles que pueden ser aplicados con mayor confiabilidad a la planta real.

Descripción del funcionamiento de la Planta Piloto perteneciente a la Planta El Dorado de Bogotá.

La planta piloto tiene una escala 8 a 1 respecto a la planta real, en esta el agua tiene el mismo tren de tratamiento de la planta real. El proceso inicia con la aplicación de pre cal (ver foto No 18 y No 19), luego se adiciona el coagulante (Sulfato de Aluminio) (ver foto No 20), por medio de unas bombas, después el agua tomada de la fuente original de donde es tomada el agua para la planta real (embalse de la Regadera) sale y pasa por una canaleta Parshall (ver foto No 21), en donde se genera la mezcla rápida, luego esta es dirigida por un canal hacia los floculadores en serie, en los mismos grupos que en la planta real (ver fotos No 22, No 23 y No 24). Posteriormente el agua pasa por los sedimentadores de alta tasa (ver fotos No 25 y No 26) en donde son retenidos todos los solidos que se sedimentaron en el proceso anterior. Por último el agua pasa por los filtros, (ver fotos No 27 y No 28) y finalmente llega a un tanque de descarga ya que para este caso el agua no es desinfectada ni almacenada para distribuir.



Foto No 18 mecanismo de aplicación pre cal y coagulante



Foto No 19 Mezcla de cal



Foto No 20 Mezcla de coagulante.

Las fotos No 18, No 19 y No 20, muestran la fase inicial del tren de tratamiento de la planta piloto, en la cual se mezcla la cal y el Sulfato de Aluminio con el agua. Estos son succionados de los contenedores para ser elevados a la siguiente fase del tren de tratamiento.



Foto No 21 Canaleta Parshall

La foto No 21 muestra la segunda parte del tren de tratamiento, en donde la cal y el Sulfato de Aluminio llegan a la canaleta Parshall, la cual genera una mezcla rápida.



Foto No 22 Floculador de 8 paletas.



Foto No 23 Floculador de 6 paletas



Foto No 24 Floculador de 4 paletas.

En las fotos No 22, No 23, y No 24 se muestra la tercera parte del tren de tratamiento, en donde el agua pasa por los floculadores, los cuales tienen una distribución de paletas diferente para cada caso.



Foto No 25 sedimentador de alta tasa



Foto No 26 placas inclinadas del sedimentador.

En las fotos No 25 y 26 se observa la cuarta parte del tren de tratamiento, donde el agua pasa muy lentamente por el sedimentador de alta tasa, en donde le es retirado una gran parte del material sólido suspendido



Foto No 27 Vista superior filtros



Foto No 28 vista frontal filtros

Las fotos No 27 y No 28, ilustran el último proceso en el tren de tratamiento de esta planta piloto, que es la filtración; Donde el agua que sale del sedimentador es pasada por estos filtros de antracita, por medio de gravedad, y en ellos es retirado el material sólido suspendido que trae el agua.

La totalidad de la planta piloto funciona de forma automática con una consola de mando ubicada en la parte baja de la misma. (ver foto No 29)



Foto No 29 consola de mando planta piloto

En la foto No 29 se encuentra la consola de mando de la planta piloto, de donde se puede activar o desactivar cualquier proceso de forma que se pueden hacer los experimentos con diferentes modalidades de funcionamiento.

Gradiente de velocidad para floculadores mecánicos

Para calcular el gradiente de velocidad en cada uno de los casos de la primera parte del experimento, se utilizaron las ecuaciones No 1 y No 2 las cuales relacionan el área de las paletas dentro del floculador, con la velocidad de mezcla y el gradiente de velocidad de floculación.

$$P = \frac{C_d \cdot A \cdot \rho \cdot V_p^3}{2} \quad (\text{Ecuación No 1})^{[3]} \quad G = \sqrt[2]{\frac{P}{Vol \cdot \mu}} \quad (\text{Ecuación No 2})^{[3]}$$

Donde

P = Potencia de entrada W

C_d = Coeficiente de arrastre de las paletas

A = Área total de las paletas m^2

ρ = Densidad del agua, $\frac{kg}{m^3}$

V_p = Velocidad relativa de las paletas con respecto al fluido 0.6 – 0.75 veces la velocidad tangencial, $\frac{m}{s}$

G = Gradiente de velocidad, s^{-1}

P = Potencia de entrada, W

Vol = Volumen del tanque de floculación, m^3

μ = viscosidad dinámica del agua, $\frac{N \cdot s}{m^2}$, $\frac{Kg}{m \cdot s}$

En esta primera parte del experimento la única variable que se utilizara será el área de las paletas, así las constantes serán.

Constantes

$$C_d = 1.90$$

$$\rho = 999.1 \frac{kg}{m^3}$$

$$V_p = 0.75 * 0.0191 = 0.01432 \frac{m}{s}$$

$$\text{Volumen} = 0.274 m^3$$

Turbiedad 1 = Turbiedad medida en el turbidímetro después de sacar la muestra de cada floculador.

Turbiedad 2 = Turbiedad medida en el turbidímetro, medida después de dejar sedimentar la muestra durante 1.15 horas.

Para la segunda parte del experimento serán utilizadas las mismas dos ecuaciones mencionadas anteriormente, pero la variable será la velocidad de mezcla, que será 1.75 rev/min para el primer experimento, 5 rev/min para la segunda prueba y 8.5 rev/min para la tercera prueba.

METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN

La metodología utilizada tiene dos objetivos principales que son: documentar microscópicamente el paso del agua por el tren de tratamiento, donde se espera encontrar las formaciones de los tipos de floc, distintos tipos de microorganismos que habitan en el agua y distintos tipos de cristales compuestos por sales disueltas en el agua, además de los formados por el coagulante y obtener la optimización máxima del proceso de floculación en la planta piloto. Cabe aclarar que estas metodologías cuentan con un margen de error amplio, ya que la forma de identificar todo lo encontrado bajo el microscopio es comparar las fotografías con fotografías de distintas fuentes bibliográficas, y este método no es 100% confiable. Por otro lado para obtener el gradiente de velocidad, no se cuenta con el material adecuado, por lo que se pueden generar errores en la toma de las muestras.

Documentación de procesos.

Para la documentación microscópica del proceso de tratamiento en la planta El Dorado de Bogotá se realizó un recorrido por todo el tren de tratamiento, durante el cual se tomaron muestras de $8.63 * 10^{-5} m^3$ en vasos de vidrio con tapa (*ver foto No 30*), con un muestreador de profundidad (*ver fotos No 31 y No 32*). Luego estas muestras fueron analizadas cuidadosamente bajo un microscopio Biológico (Q720D) y a cada muestra se le tomaron distintas fotos con una cámara Canon Powershot A 450 de 5 megapíxeles, buscando dentro de las mismas microorganismos, cristales o formaciones de flocs.



Foto No 30 Recipiente para la toma de muestras



Foto No 31. Muestreador de profundidad



Foto No 32. Muestreador de Profundidad listo

Obtención del gradiente de floculación óptimo por medio de cambio en las a reas de las paletas.

Para obtener el gradiente de óptimo velocidad se realizó el siguiente procedimiento:

Dosificación de químicos

Lo primero que se realizó fue la dosificación de químicos, en el caso del Sulfato de Aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) (coagulante) se realizó una solución de 2040Kg en un recipiente con 80 l de agua. Por otra parte, en el caso de la Cal, se realizó una solución de 0.60 Kg en un recipiente con 80 l de agua, con el fin de obtener una concentración de coagulante y de cal de 17 ppm y 0.5 ppm respectivamente, ya que estas son las concentraciones que se manejan en la planta El Dorado.

Aforo de caudal

En este caso se utilizó una probeta de 1000 ml y un cronometro, con los cuales se aforo el caudal de entrada que llega a los floculadores, con el fin de obtener un caudal constante aproximado de 1000 ml/s.

Operación de la planta piloto

Se puso en funcionamiento la planta piloto con su configuración original, teniendo en cuenta que las paletas en los floculadores con la configuración inicial tienen unas medidas de 0.625 m de largo, 0.02 m de ancho y 0.01 m de grosor.

Toma de muestra

Al estar los floculadores en funcionamiento aproximadamente 5 min después de estar llenos, se utilizó un vaso de vidrio de 11 cm de altura y 5 cm de radio, con un volumen total de $8.63 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ para tomar la muestra de agua del primer floculador, destapando el vaso después de haberlo llevado tapado hasta aproximadamente la mitad de la profundidad del floculador, luego al sacarlo del agua taparlo y llevarlo agitando lo menos posible hacia el turbidímetro.

Medida de turbiedad

Después de llevar la muestra hasta el turbidímetro, medir la turbiedad inicial en el mismo, luego dejar sedimentar la muestra durante 1.15 horas y volver a medir la turbiedad.

Cambio de paletas

Después de realizar todos los pasos anteriores, se retiraron las paletas con las que se estaba trabajando y se cambiaron por las siguientes paletas (0.64 m largo, 0.04 ancho y 0.01 grosor). Para esto se utilizó como medio de soporte, alambre dulce, con el que se mantuvieron las paletas sobre los ejes de rotación.

Luego se realizan de nuevo los pasos 4.2.3, 4.2.4, 4.2.5 y 4.2.6, hasta que se obtiene la configuración de paletas para la cual el primer floculador tiene la menor turbiedad de entrada y de salida, y con esto queda optimizado el primer floculador.

Teniendo el primer floculador optimizado, se repiten los pasos 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4, 4.2.5 y 4.2.6, para obtener la optimización del segundo floculador.

Luego se realizan los pasos 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4, 4.2.5, y 4.2.6 para los otros tres floculadores, con lo que se obtiene la optimización de los 5 floculadores como el proceso en conjunto.

Estos cambios en la configuración de las paletas de los floculadores, se realizaron con el objetivo de variar el gradiente de velocidad dentro del proceso, para observar cómo se comportaba la turbiedad del agua, para con esto saber si la configuración original de paletas en los floculadores de la planta piloto es la configuración óptima.

Prueba de la velocidad como parámetro de optimización del gradiente de velocidad

Cambios de velocidad

Del paso anterior se obtiene el gradiente óptimo por medio del cambio en el área de las paletas de los floculadores, después se aumentará la velocidad de floculación (pasa de 5 rev/min a 8.5 rev/min) en la consola de mando, y se realizarán los pasos 4.2.3, 4.2.4 y 4.2.5, con el fin de obtener la turbiedad inicial y final con el cambio de la velocidad, para poder comparar los resultados con los resultados obtenidos al trabajar la planta piloto con la velocidad normal de trabajo (5 rev/min).

Luego se reducirá la velocidad de floculación, (pasando de 5 rev/min (velocidad inicial) a 1.75 rev/min) y se repetirán los pasos 4.2.3, 4.2.4 y 4.2.5 con el objetivo de comparar las turbiedades obtenidas con esta velocidad con las turbiedades obtenidas con las velocidades anteriores y con esta comparación mostrar que la velocidad puede usarse como otro parámetro de optimización del proceso de floculación.

RESULTADOS

Documentación microscópica del tren de tratamiento

Cámara de entrada

Este es el punto inicial del tren de tratamiento, en este punto se tomaron varias muestras en las que se encontraron Cristales posiblemente formados por sales metálicas disueltas en el agua (ver foto No 33)

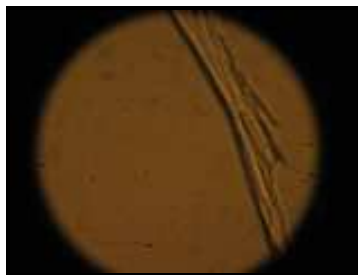


Foto No 33. Cristales

En la foto No 33 se observa una muestra de agua al microscopio, en la que se diferencia una forma similar a la que tienen los cristales formados por sales de hierro disueltas en el agua. Esta deducción se obtuvo de las observaciones realizadas con el profesor Rigoberto Gomez C perteneciente al departamento de Química de la Universidad de Los Andes.

Cascada

En este lugar se tomaron muestras de agua las cuales fueron observadas en el microscopio. En estas observaciones se encontraron diferentes tipos de algas verdes (ver Fotos No 34, No 35, No 36 y No 37) y dinoflagelados (ver Fotos No 38 y No 39). Nuevamente se encontraron cristales formados por sales de hierro (ver Foto No 40).



Foto No 34. Scenedesmus opoliensis

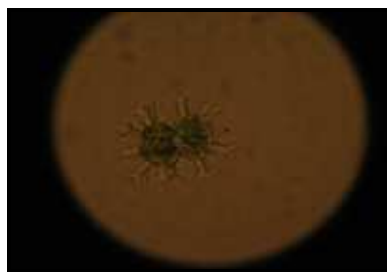


Foto No 35. Chodelata Ciliata



Foto No 36. Straurastrum

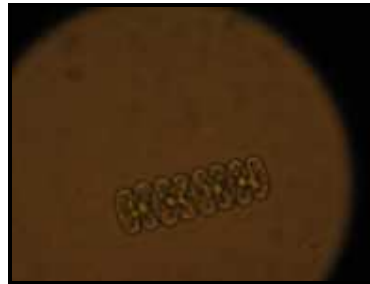


Foto No 37. Scenedesmus acutus

En la Foto No 34 se observa un alga verde que pertenece al grupo de las *Scenedesmus opoliensis*, este tipo de algas tiene un tamaño que oscila entre 17 y 28 μm , comúnmente se encuentra en estanques y ríos, por lo que se esperaba encontrarla en la muestra, ya que hasta este punto de tratamiento, el agua no ha recibido ningún producto químico que pueda alterar o destruir este tipo de algas.^[5]

En la Foto No 35 se observa otro tipo de alga verde, que pertenece al grupo de las *Chodelata Ciliata*, en cuanto al tamaño el ancho varía entre 6 y 18 μm , y el largo que varía entre 10 y 21 μm , son comunes en estanques, por lo cual también se esperaba que estuviera presente en estas muestras.^[5]

En la Foto No 36 se puede ver otro tipo de alga verde que pertenece a la familia *Straurstrum*, esta tipo en particular, se caracteriza por ser de tamaño pequeño 125 y 30 μm , cuatro brazos largos, ondulados y divergentes, posee dos hemicelulas que están giradas una respecto a la otra, se pueden encontrar hemicelulas con tres brazos, este tipo de algas es plancton y se encuentra principalmente en las orillas de aguas eutróficas.^[5]

La Foto No 37 se muestra un alga verde perteneciente al grupo de las *Scenedesmus acutus*. Este grupo esta conformado por colonias de 4 a 8 células, ubicadas en hilera con células centrales iguales a las células laterales, con un largo de aproximadamente 10 μm . Son algas verdes que se encuentran frecuentemente como plancton en lagos, estanques y piletas de las fuentes, por lo cual, al igual que las anteriores se esperaban encontrar en esta muestra, ya que el agua de la muestra proviene originalmente de un embalse, el cual es un sistema léntico como lo son los lagos y estanques.^[5]

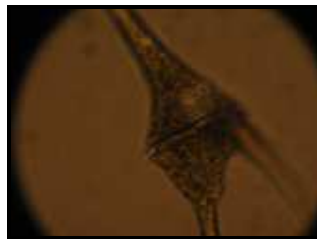


Foto No 38 Ceratium

hirundinella



Foto No 39 Ceratium

hirundinella

En las Fotos No 38 y No 39, se observan dinoflagelados los cuales pertenecen al grupo de los *Ceratium hirundinella*. Este tipo de dinoflagelados se caracteriza por tener un cuerno apical muy largo, con el extremo abierto. El largo de este tipo de dinoflagelados, es de 200 a 400 μm , habita en estanques y lagos, y se puede alimentar de forma autótrofa y heterótrofa, capturando pequeños organismos con filamentos plasmáticos. [5] Por otra parte en la Foto No 40 se observan los cristales formados por las sales de hierro disueltas en el agua.



Foto No 40. Cristales formados por sales de hierro disueltas

Floculadores

Al analizar las muestras recogidas en los floculadores se encontraron distintos tipos de algas verdes (ver fotos No 41 y No 42), los tres tipos de formación de flocs (ver fotos No 43, No 44, No 45 y No 46), formaciones cristalinas de sales de hierro (ver fotos No 47, No 48 y No 49) y Sulfato de aluminio (ver fotos No 50 y 51) y se encontró además dinoflagelados (ver foto No 52).



Foto No 41 distintos tipos de algas verdes

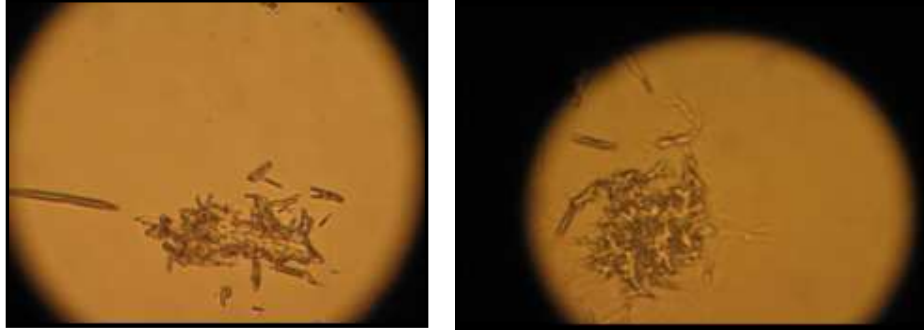


Foto No 42 algas verdes

En la foto No 41 se encuentran dos tipos de algas verdes, al lado izquierdo se encuentra un *Scenedesmus opoliensis*, el cual fue descrito anteriormente. Al lado derecho se encuentra un *Chlorococcum multinucleatum*, Éstos son cloroplastos semiesféricos, los cuales pueden tener varios núcleos, se caracterizan por tener una membrana fina de 3 a 5 μm y tiene un radio de hasta 25 μm . Este tipo de alga es más frecuente en suelos, forma vestimentos verdes pulverulentos sobre la tierra, o troncos de los árboles y frecuentemente se encuentra como simbiote en los líquenes.[5]

El alga verde que se encuentra en la parte superior de la foto No 42, pertenece al grupo *Chodelata Ciliata*, que fue descrito anteriormente (ver pagina 6), en la parte inferiorse encuentra

un alga que pertenece al grupo *Scenedesmus securiformis*, este grupo se caracteriza por formar pequeñas colonias de 2 y 4 células, son células sin espinas, tienen una forma rectangular o trapezoidal, son parejas de células de igual forma, llegan a medir hasta 15 µm de largo y se encuentran principalmente en aguas muy limpias y con poca contaminación, además tiende a ser muy abundante. [5]



Fotos No 43 y 44 flocs filamentosos

Los flocs filamentosos se forman gracias a la agrupación de bacterias filamentosas que se agregan a la matriz base formada por la unión de partículas coloidales con moléculas de floculante (sulfato de aluminio).

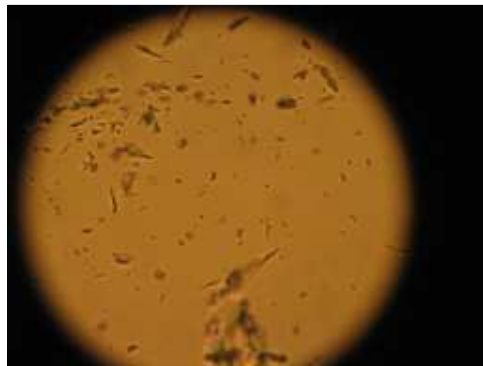


Foto No 45 Flocs en fase dispersa

Los "flocs" en fase dispersa, se presentan por agregaciones de bacterias las cuales no tienen afinidad con el floculante, debido a esto se generan microflocs los cuales ocasionan un inconveniente, ya que por su pequeño tamaño no son fácilmente removidos en el siguiente proceso del tren de tratamiento (la sedimentación).



Foto No 46 floc normal

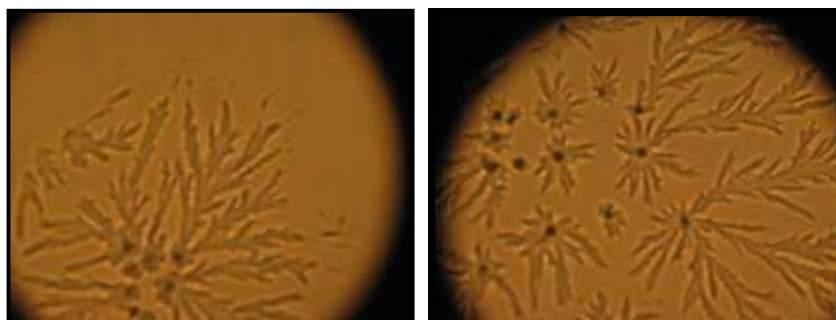
Los flocs normales se forman por la aglomeración de material particulado en el agua, donde la acción química que tiene el coagulante (Sulfato de Aluminio) y a la acción física que causa el proceso de mezcla lenta en las partículas ocasiona el choque de unas partículas con otras, de forma que se generan conjuntos grandes de partículas que son más fáciles de remover en el proceso posterior de sedimentación.



Fotos No 47, No 48 y No 49 cristales de sales disueltas

Los cristales de sales disueltas, se forman por varios tipos de sales encontrados en el agua los cuales se cristalizan durante el proceso de floculación; dentro de los cristales de sales disueltas

que se encontraron durante el análisis esta el cristal formado por sales de hierro disueltas. (Análisis realizado con el profesor Rigoberto Gómez C, perteneciente al departamento de Química de la Universidad de Los Andes).



Fotos No 50 y No 51 Cristales de sulfato de aluminio

Otros cristales que comúnmente se encuentran en los flocs durante el proceso de floculación son los cristales de Sulfato de Aluminio, este último es el floculante más efectivo que se conoce hasta el momento. Al ser agregado al agua, este compuesto forma cristales, los cuales sirven como matriz base para que las bacterias filamentosas se congreguen sobre la misma, para formar los flocs. En estas fotos Puede ver con claridad su forma, donde en algunos puntos se generan mayores concentraciones de Sulfato de Aluminio a partir de las cuales se comienza a estructurar el cristal.



Foto No 52 dinoflagelados

En la foto No 52 se observa un tipo de dinoflagelado que pertenece a la familia *Ceratium hirundinella*, se caracteriza por tener un cuerno apical muy largo, con un extremo abierto, un par de cuernos basales, además de tener cloroplastos agrupados en la base de los cuernos y en los extremos del cinturón. Tiene un cuerpo que llega a los 400µm de largo, pero en promedio mide de 200 µm a 300 µm, vive principalmente en estanques y lagos, y forma flores de agua. Se alimenta de forma heterótrofa y autótrofa, captura pequeños organismos con unos filamentos plasmáticos que surgen por los poros de las placas del caparazón y por el orificio del ápice. Un pseudópodo arrastra los objetos de mayor tamaño a lo largo del surco longitudinal hasta el interior.^[5]

Filtración

En este caso se tomaron unas muestras de agua que luego fueron observadas bajo el microscopio y en éstas se encontraron cristales de sales de hierro (ver foto No 53) y *Daphnias* (pulgas de agua) (ver foto No 54)



Foto No 53 cristales de hierro

En la Foto No 53 se encontraron cristales de sales de hierro, los cuales se describieron anteriormente.



Foto No 54 Daphnias ^[6]

En la Foto No 54 se puede observar una *Daphnia* conocida con el nombre común de pulga de agua. Este crustáceo de agua dulce se encuentra comúnmente en cuerpos de agua estancados, con gran cantidad de minerales que se presentan por altos niveles de eutrofización (al igual que el alga *Straurstrum*) (como se pudo ver antes con el alga *Straurstrum*, que también es común en aguas eutróficas), por Este microorganismo tiene un tamaño que varía entre 2 mm y 6 mm, de lo cual se puede deducir que la presencia de éste en los filtros ocurre cuando este llega disuelto en el agua y posteriormente ésta agua se estanca, esto significa que la presencia de *Daphnias* no se debe a la supervivencia de ésta a través del tren de tratamiento.

Desinfección

Según el Decreto 475 de 1998, en el artículo 3, después del proceso de desinfección no se debe detectar la presencia de ningún tipo de microorganismo ni formación cristalina. (Estipulado en los artículos del 6 al 15 del mismo decreto).

En esta unidad se tomaron muestras de agua las cuales se observaron en el microscopio. En estas observaciones se encontró que ya no están presentes los microorganismos, sales disueltas y algas verdes encontradas en los procesos anteriores del tren de tratamiento.

Obtención del gradiente de velocidad optimo por medio del cambio en el área de las paletas de los floculadores.

En la tabla No 3 se muestra como cambia la turbiedad del agua y el gradiente de velocidad a medida que se varía el tamaño de las paletas dentro del primer floculador de la planta piloto.

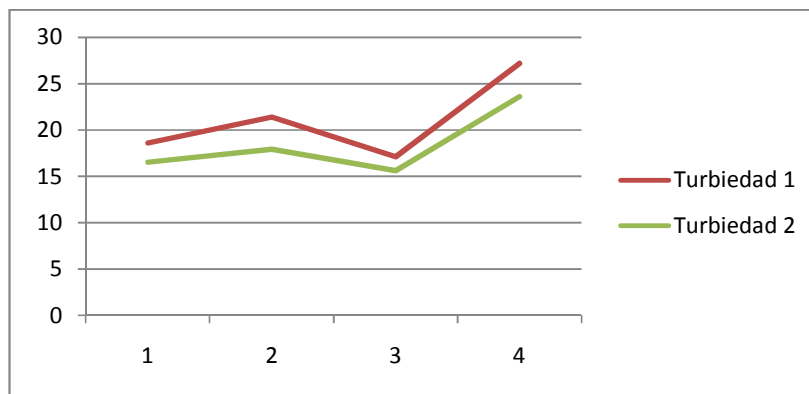
Paletas	Largo (m)	Ancho (m)	Grosor (m)	Area Total (m2)	Potencia W	Gradiente s-1	Turbiedad 1 (NUT)	Turbiedad 2 (NUT)
Originales	0.625	0.02	0.01	0.3032	4.12	91.88	21.4	17.9
Grandes	0.64	0.04	0.01	0.5184	7.048	120.2	27.2	23.6
Pequeñas	0.6	0.02	0.006	0.2515	3.419	83.7	18.6	16.5
Medianas	0.63	0.03	0.01	0.408	5.547	106.55	17.1	15.6

Tabla No 3 Gradientes y turbiedades en el floculador 1

La grafica No 3, realizada con la tabla No 4, muestra cómo cambia la turbiedad (eje Y) dentro del primer floculador de la planta piloto, si se utilizaran las paletas en orden de tamaño de menor a mayor.

Numeracion	Paletas	Area Total (m2)	Turbiedad 1 (NUT)	Turbiedad 2 (NUT)
1	Pequeñas	0.2515	18.6	16.5
2	Originales	0.3032	21.4	17.9
3	Medianas	0.408	17.1	15.6
4	Grandes	0.5184	27.2	23.6

Tabla No 4 Áreas y turbiedades para el floculador 1



Grafica No 3 Turbiedad inicial y final en el floculador 1 para los 4 tipos de paletas

En la *grafica No 3* se puede observar de una forma más clara que las paletas con las que se obtiene la menor turbiedad tanto en la primera medición como en la segunda son las paletas medianas.

En la *tabla No 5* se muestra como cambia la turbiedad del agua y el gradiente de velocidad a medida que se varía el tamaño de las paletas dentro del segundo floculador de la planta piloto.

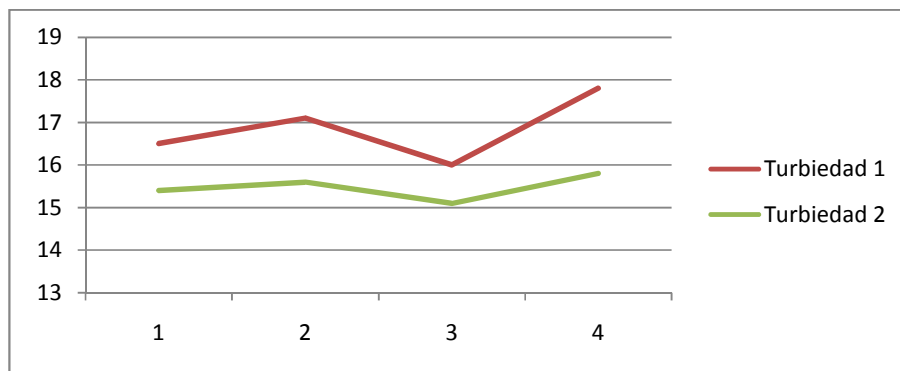
Paletas	Largo (m)	Ancho (m)	Grosor (m)	Area Total (m2)	Potencia W	Gradiente s-1	Turbiedad 1 (NUT)	Turbiedad 2 (NUT)
Originales	0.625	0.02	0.01	0.2274	3.09	79.59	17.1	15.6
Grandes	0.64	0.04	0.01	0.3888	5.27	103.91	17.8	15.8
Pequeñas	0.6	0.02	0.006	0.1886	2.604	73.04	16.5	15.4
Medianas	0.63	0.03	0.01	0.306	4.1605	90.08	16	15.1

Tabla No 5 Gradientes y turbiedades floculador 2

La *grafica No 4*, realizada con la *tabla No 6*, muestra cómo cambia la turbiedad (eje Y) dentro del segundo floculador de la planta piloto, si se utilizaran las paletas en orden de tamaño de menor a mayor.

Numeracion	Paletas	Area Total (m2)	Turbiedad 1 (NUT)	Turbiedad 2 (NUT)
1	Pequeñas	0.1886	16.5	15.4
2	Originales	0.2274	17.1	15.6
3	Medianas	0.306	16	15.1
4	Grandes	0.3888	17.8	15.8

Tabla No 6 Áreas y turbiedades para el floculador 2



Grafica No 4 Turbiedad inicial y final en el floculador 2 para los 4 tipos de paletas

En la grafica No 4 se puede observar de una forma más clara que las paletas con las que se obtiene la menor turbiedad tanto en la primera medición como en la segunda son las paletas medianas.

En la tabla No 7 se muestra como cambia la turbiedad del agua y el gradiente de velocidad a medida que se varía el tamaño de las paletas dentro del tercer floculador de la planta piloto.

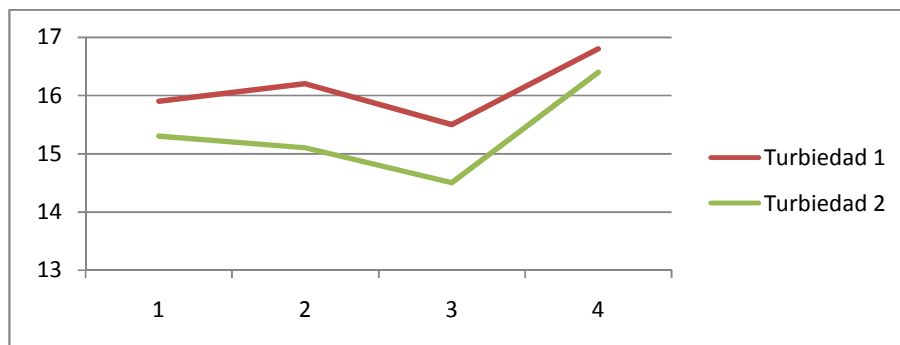
Paletas	Largo (m)	Ancho (m)	Grosor (m)	Area Total (m2)	Potencia W	Gradiente s-1	Turbiedad 1 (NUT)	Turbiedad 2 (NUT)
Originales	0.625	0.02	0.01	0.2274	3.09	79.59	16.2	15.1
Grandes	0.64	0.04	0.01	0.3888	5.27	103.91	16.8	16.4
Pequeñas	0.6	0.02	0.006	0.1886	2.604	73.04	15.9	15.3
Medianas	0.63	0.03	0.01	0.306	4.1605	90.08	15.5	14.5

Tabla No 7 Gradientes y turbiedades floculador 3

La grafica No 5, realizada con la tabla No 8, muestra cómo cambia la turbiedad (eje Y) dentro del tercer floculador de la planta piloto, si se utilizaran las paletas en orden de tamaño de menor a mayor.

Numeracion	Paletas	Area Total (m2)	Turbiedad 1 (NUT)	Turbiedad 2 (NUT)
1	Pequeñas	0.1886	15.9	15.3
2	Originales	0.2274	16.2	15.1
3	Medianas	0.306	15.5	14.5
4	Grandes	0.3888	16.8	16.4

Tabla No 8 Áreas y turbiedades para el floculador 3



Grafica No 5 Turbiedad inicial y final en el floculador 3 para los 4 tipos de paletas

En la grafica No 5 se puede observar de una forma más clara que las paletas con las que se obtiene la menor turbiedad tanto en la primera medición como en la segunda son las paletas medianas.

En la tabla No 9 se muestra como cambia la turbiedad del agua y el gradiente de velocidad a medida que se varía el tamaño de las paletas dentro del cuarto floculador de la planta piloto.

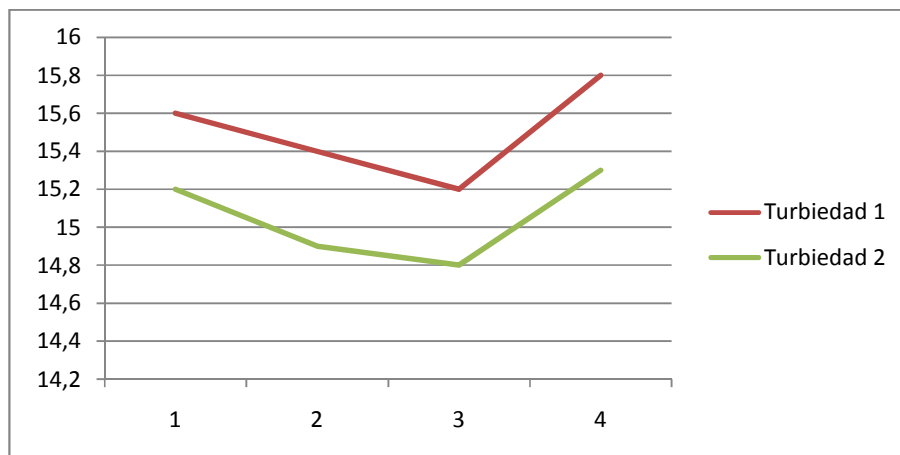
Paletas	Largo (m)	Ancho (m)	Grosor (m)	Area Total (m2)	Potencia W	Gradiente s-1	Turbiedad 1 (NUT)	Turbiedad 2 (NUT)
Originales	0.625	0.02	0.01	0.1516	2.06	64.97	15.4	14.9
Grandes	0.64	0.04	0.01	0.2592	3.524	84.97	15.8	15.3
Pequeñas	0.6	0.02	0.006	0.1257	1.709	59.17	15.6	15.2
Medianas	0.63	0.03	0.01	0.204	2.773	75.38	15.2	14.8

Tabla No 9 Gradientes y turbiedades floculador 3

La grafica No 6, realizada con la tabla No 10, muestra cómo cambia la turbiedad (eje Y) dentro del cuarto floculador de la planta piloto, si se utilizaran las paletas en orden de tamaño de menor a mayor.

Numeracion	Paletas	Area Total (m2)	Turbiedad 1 (NUT)	Turbiedad 2 (NUT)
1	Pequeñas	0.1257	15.6	15.2
2	Originales	0.1516	15.4	14.9
3	Medianas	0.204	15.2	14.8
4	Grandes	0.2592	15.8	15.3

Tabla No 10 Áreas y turbiedades para el floculador 4



Grafica No 6 Turbiedad inicial y final en el floculador 4 para los 4 tipos de paletas

En la grafica No 6 se puede observar de una forma más clara que las paletas con las que se obtiene la menor turbiedad tanto en la primera medición como en la segunda son las paletas medianas.

En la tabla No 11 se muestra como cambia la turbiedad del agua y el gradiente de velocidad a medida que se varía el tamaño de las paletas dentro del quinto floculador de la planta piloto.

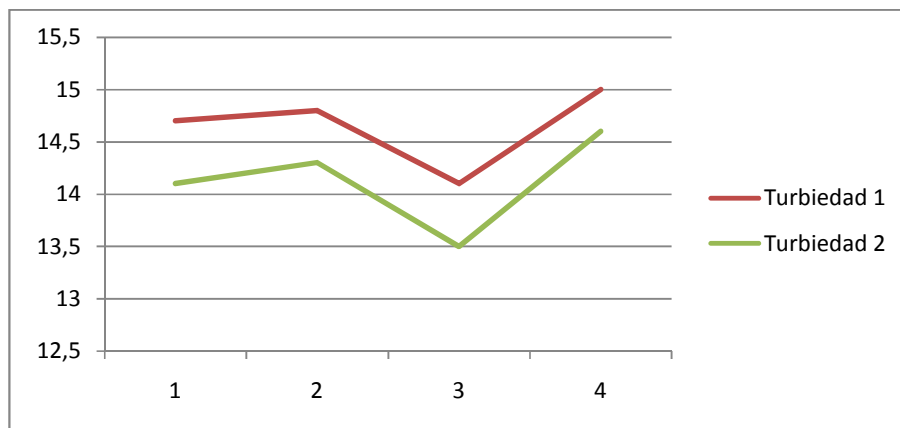
Paletas	Largo (m)	Ancho (m)	Grosor (m)	Area Total (m2)	Potencia W	Gradiente s-1	Turbiedad 1 (NUT)	Turbiedad 2 (NUT)
Originales	0.625	0.02	0.01	0.1516	2.06	64.97	14.8	14.3
Grandes	0.64	0.04	0.01	0.2592	3.524	84.97	15	14.6
Pequeñas	0.6	0.02	0.006	0.1257	1.709	59.17	14.7	14.1
Medianas	0.63	0.03	0.01	0.204	2.773	75.38	14.1	13.5

Tabla No 11 Gradientes y turbiedades floculador 5

La grafica No 7, realizada con la tabla No 12, muestra cómo cambia la turbiedad (eje Y) dentro del cuarto floculador de la planta piloto, si se utilizaran las paletas en orden de tamaño de menor a mayor.

Numeracion	Paletas	Area Total (m2)	Turbiedad 1 (NUT)	Turbiedad 2 (NUT)
1	Pequeñas	0.1257	14.7	14.1
2	Originales	0.1516	14.8	14.3
3	Medianas	0.204	14.1	13.5
4	Grandes	0.2592	15	14.6

Tabla No 12 Áreas y turbiedades para el floculador 5



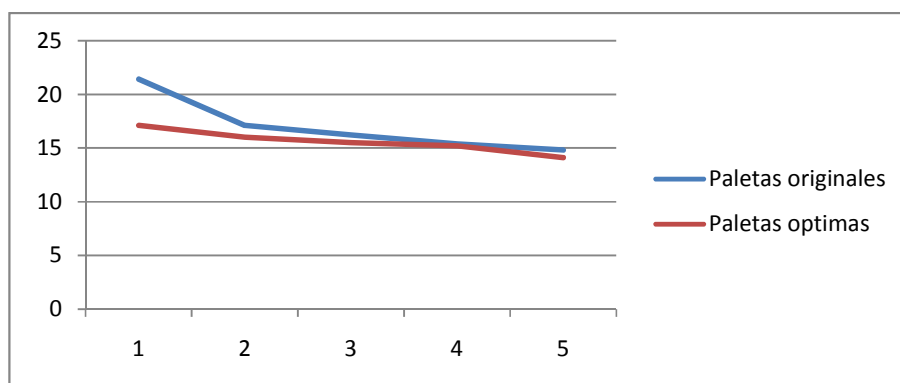
Grafica No 7 Turbiedad inicial y final en el floculador 5 para los 4 tipos de paletas

En la grafica No 7 se puede observar de una forma más clara que las paletas con las que se obtiene la menor turbiedad tanto en la primera medición como en la segunda son las paletas medianas.

La grafica No 8 (realizada con la tabla No 13) muestra la diferencia que hay entre la turbiedad inicial del agua durante el proceso de floculación en la planta piloto con la configuración original de las paletas y la turbiedad inicial obtenida con la configuración de paletas encontrada experimentalmente como la optima.

Paletas	Floculador 1	Floculador 2	Floculador 3	Floculador 4	Floculador 5
Originales	21.4	17.1	16.2	15.4	14.8
Optimas	17.1	16	15.5	15.2	14.1

Tabla No 13 Comparación de turbiedades iniciales. Configuración original Vs configuración optima



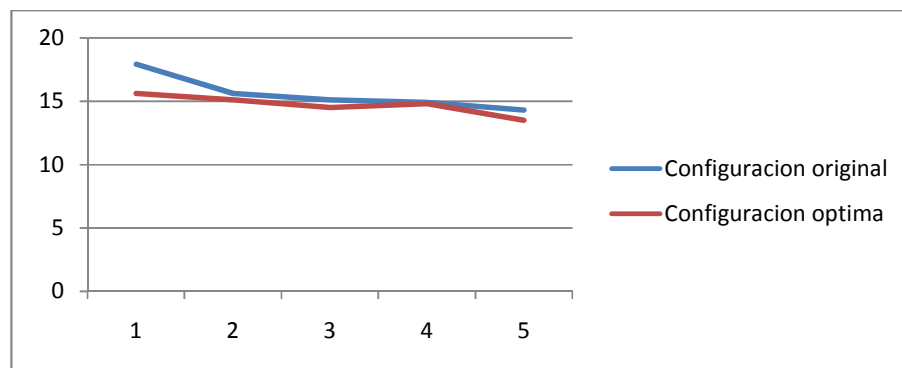
Grafica No 8 comparación de turbiedad inicial, configuración original de paletas Vs configuración optima de paletas

La tabla No 13 y la grafica No 8 muestran de una forma clara que con el cambio en la configuración de las paletas si se obtiene una disminución en la turbiedad inicial encontrada para cada uno de los floculadores de la planta piloto.

La grafica No 9 (realizada con la tabla No 14) muestra la diferencia que hay entre la turbiedad final del agua durante el proceso de floculación en la planta piloto con la configuración original de las paletas y la turbiedad final obtenida con la configuración de paletas encontrada experimentalmente como la optima.

Paletas	Floculador 1	Floculador 2	Floculador 3	Floculador 4	Floculador 5
Originales	17.9	15.6	15.1	14.9	14.3
Optimas	15.6	15.1	14.5	14.8	13.5

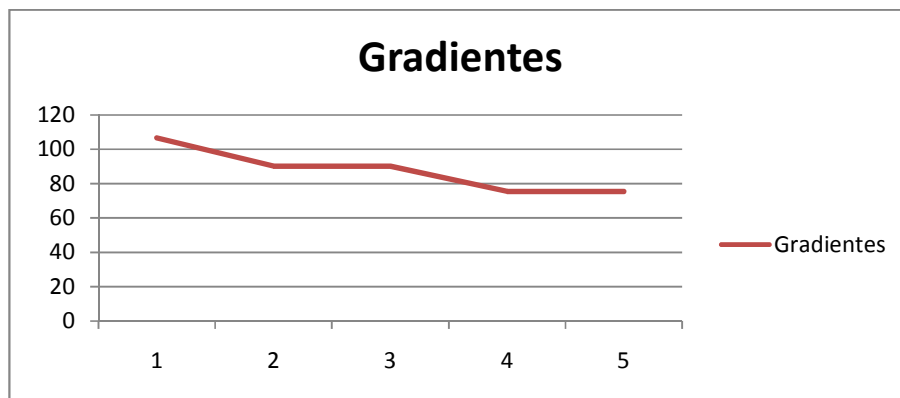
Tabla No 14 Comparación de turbiedades finales. Configuración original Vs configuración optima



Grafica No 9 comparación de turbiedad inicial, configuración original de paletas Vs configuración optima de paletas

La tabla No 14 y la grafica No 9 muestran de una forma clara que con el cambio en la configuración de las paletas si se obtiene una disminución en la turbiedad final encontrada para cada uno de los floculadores de la planta piloto, lo que directamente muestra una optimización del proceso de floculación.

La grafica No 10 muestra como el gradiente de velocidad va disminuyendo mientras el agua pasa por los floculadores, lo que concuerda con toda la teoría consultada [3], [7], [8] en la que queda claro que el gradiente de velocidad debe ir disminuyendo al pasar del primer floculador al segundo, y disminuir mas al pasar al tercero, ya que se el gradiente aumenta al pasar de un floculador a otro, los flocs formados en el floculador anterior se pueden romper y generar un aumento en la turbiedad inicial y por ende en la turbiedad final, lo que afecta la calidad del agua.



Grafica No 10 Cambio del gradiente con el paso por los floculadores de la planta piloto

Cambios en la velocidad de mezcla

Para realizar los cálculos con los que se obtuvieron los resultados de la segunda parte del experimento, se utilizaron las Ecuaciones 1 y 2, descritas en el numeral anterior

La tabla No 15 muestra los resultados óptimos obtenidos en el primer experimento La primera velocidad que se probó fue de 5 rev/min, con la cual se obtuvo una velocidad tangencial de 0.0191 m/s.

Floculador	Largo (m)	Ancho (m)	Grosor (m)	Area Total (m2)	Potencia W	Gradiente s-1	Turbiedad 1 (NUT)	Turbiedad 2 (NUT)
1	0,63	0,03	0,01	0,408	5,547	106,5	17,1	15,6
2	0,63	0,03	0,01	0,306	4,1605	90,08	16	15,2
3	0,63	0,03	0,01	0,306	4,1605	90,08	15,5	15,1
4	0,63	0,03	0,01	0,204	2,773	75,38	15,2	14,9
5	0,63	0,03	0,01	0,204	2,773	75,38	14,1	13,5

Tabla No 15 Gradientes y turbiedades velocidad 1

En la Tabla No 16 se muestra como cambia el gradiente, la turbiedad y la potencia de forma significativa, al aumentar la velocidad de 5 rev/min a 8.5 rev/min, con lo cual se obtiene una velocidad tangencial de 0.229 m/s.

Floculador	Largo (m)	Ancho (m)	Grosor (m)	Area Total (m2)	Potencia W	Gradiente s-1	Turbiedad 1 (NUT)	Turbiedad 2 (NUT)
1	0,63	0,03	0,01	0,408	9,41	138,86	30,3	25,2
2	0,63	0,03	0,01	0,306	7,057	120,25	20,4	18,2
3	0,63	0,03	0,01	0,306	7,057	120,25	17,8	16,3
4	0,63	0,03	0,01	0,204	4,7051	98,19	15,3	15
5	0,63	0,03	0,01	0,204	4,7051	98,19	14,8	13,7

Tabla No 16 Gradientes, potencias y turbiedades velocidad 2.

En la Tabla No 17 se muestra el cambio del gradiente, la turbiedad y la potencia, al reducir la velocidad de a 1.75 rev/min, con la cual se obtiene una velocidad tangencial de 6.67×10^{-3} m/s

Floculador	Largo (m)	Ancho (m)	Grosor (m)	Area Total (m2)	Potencia W	Gradiente s-1	Turbiedad 1 (NUT)	Turbiedad 2 (NUT)
1	0,63	0,03	0,01	0,408	1,937	63,02	31,8	23,9
2	0,63	0,03	0,01	0,306	1,4529	54,57	22,1	19,3
3	0,63	0,03	0,01	0,306	1,4529	54,57	17,9	16,6
4	0,63	0,03	0,01	0,204	0,968	44,55	15,6	15,3
5	0,63	0,03	0,01	0,204	0,968	44,55	15	14,1

Tabla No 17 Gradientes, potencias y turbiedades velocidad 3

DISCUSIÓN

Con el desarrollo de la fase experimental se corrobora que el parámetro que serviría como indicador para determinar la eficiencia de la floculaciones la turbiedad presente en el agua. Esta se midió a la salida de cada floculador y después de un tiempo de sedimentación de 1.15 horas, el cual es igual para todas la muestras que se van comparar, ya que si este tiempo es diferente para cada una de las muestras, la medición de la turbiedad se alteraría arrojando resultados erróneos.

De acuerdo con los experimentos realizados en la planta piloto, se encontró que el proceso de floculación que se realiza actualmente en la PTAP El Dorado podría no ser el óptimo ya que el área de las paletas es menor a la que en realidad deberían tener para obtener una optimización real aproximadamente del 5%.

Esta mayor área genera un movimiento más parejo y un gradiente de velocidad óptimo con el cual se obtiene una mejor mezcla, que deriva en flocs más grandes, densos y pesados, que son más fáciles de remover en el proceso posterior de sedimentación.

Largo (m)	Ancho (m)	Grosor (m)	Area Total (m2)	Potencia W	Gradiente s-1	Turbiedad 1 (NUT)	Turbiedad 2 (NUT)
0,625	0,02	0,01	0,3032	4,12	91,88	21,4	17,9
0,625	0,02	0,01	0,2274	3,09	79,59	17,1	15,6
0,625	0,02	0,01	0,2274	3,09	79,59	16,2	14,5
0,625	0,02	0,01	0,1516	2,06	64,97	15,4	14,8
0,625	0,02	0,01	0,1516	2,06	64,97	14,8	14,3

Tabla No 18 Gradientes y turbiedades para el proceso actual (en planta piloto)

Largo (m)	Ancho (m)	Grosor (m)	Area Total (m2)	Potencia W	Gradiente s-1	Turbiedad 1 (NUT)	Turbiedad 2 (NUT)
0,63	0,03	0,01	0,408	5,547	106,55	17,1	15,6
0,63	0,03	0,01	0,306	4,1605	90,08	16	15,1
0,63	0,03	0,01	0,306	4,1605	90,08	15,5	15,1
0,63	0,03	0,01	0,204	2,773	75,38	15,2	14,9
0,63	0,03	0,01	0,204	2,773	75,38	14,1	13,5

Tabla No 19 Gradientes y turbiedades resultado experimental (planta piloto)

	Proceso actual		Resultado experimento		% de optimizacion	
	Turbiedad 1	Turbiedad 2	Turbiedad 1	Turbiedad 2	Turbiedad 1	Turbiedad 2
Floculador 1	21,4	17,9	17,1	15,6	20,09345794	12,84916201
Floculador 2	17,1	15,6	16	15,1	6,432748538	3,205128205
Floculador 3	16,2	14,5	15,5	15,1	4,320987654	-4,137931034
Floculador 4	15,4	14,8	15,2	14,9	1,298701299	-0,675675676
Floculador 5	14,8	14,3	14,1	13,5	4,72972973	5,594405594

Tabla No 20 Porcentajes de optimización para cada floculador respecto a turbiedades. (planta piloto)

Al comparar los resultados de las tablas anteriores, se puede observar que se cumple con la regla de gradientes de la teoría de floculación, en la cual se explica que los gradientes de floculación deben disminuir gradualmente mientras más se avanza en este proceso. De esta forma tanto en el proceso actual como en el resultado de la experimentación, el gradiente disminuye gradualmente al pasar de un grupo de floculadores a otro.

Por otro lado aunque el cambio en el área de las paletas muestra una disminución en la turbiedad final, (lo cual se espera al optimizar este proceso) a la que se tiene con la configuración inicial de los floculadores. En la tabla No 20 se observa que no todos los floculadores optimizan la turbiedad final, aunque optimicen la turbiedad inicial.

En la segunda parte del experimento, se encontró que la velocidad óptima para la floculación, es la velocidad con la que se trabajó durante todo el proceso de experimentación. Esta se obtuvo después de haber realizado la optimización del proceso cambiando el área de las paletas.

Lo que se encontró en esta segunda parte del experimento era predecible, ya que por restricciones de tiempo no se pudo trabajar con diferentes velocidades cercanas a la velocidad con la que se trabajo la primera parte del experimento.

Hubo la necesidad de realizar los ensayos con velocidades extremas, para comprobar de forma experimental las aseveraciones de la teoría, que en este caso resultaron ser ciertas, esto se observa en las tablas No 21 y No 22.

Floculador	Largo (m)	Ancho (m)	Grosor (m)	Area Total (m2)	Potencia W	Gradiente s-1	Turbiedad 1 (NUT)	Turbiedad 2 (NUT)
1	0,63	0,03	0,01	0,408	9,41	138,86	30,3	25,2
2	0,63	0,03	0,01	0,306	7,057	120,25	20,4	18,2
3	0,63	0,03	0,01	0,306	7,057	120,25	17,8	16,3
4	0,63	0,03	0,01	0,204	4,7051	98,19	15,3	15
5	0,63	0,03	0,01	0,204	4,7051	98,19	14,8	13,7

Tabla No 21 Gradientes y turbiedades para una velocidad de 8.5 rev/min

Floculador	Largo (m)	Ancho (m)	Grosor (m)	Area Total (m2)	Potencia W	Gradiente s-1	Turbiedad 1 (NUT)	Turbiedad 2 (NUT)
1	0,63	0,03	0,01	0,408	1,937	63,02	31,8	23,9
2	0,63	0,03	0,01	0,306	1,4529	54,57	22,1	19,3
3	0,63	0,03	0,01	0,306	1,4529	54,57	17,9	16,6
4	0,63	0,03	0,01	0,204	0,968	44,55	15,6	15,3
5	0,63	0,03	0,01	0,204	0,968	44,55	15	14,1

Tabla 1No 22 Gradientes y turbiedades para una velocidad de 1.75 rev/min

Los resultados presentados en las tablas No 21 y No 22 corroboran lo que se encontró en la teoría. Esta afirma que se pueden presentar problemas en la floculación cuando la velocidad rotacional de mezcla lenta es extrema, superior a 8 rpm ya que en ésta los flocs se pueden romper, lo cual aumenta la turbiedad. Por otra parte un velocidad rotacional de mezcla muy lenta, menor a 2 rpm no genera el movimiento suficiente de las partículas de agua para que la mezcla de éstas sea completa, por lo cual no se presentan choques que permiten la formación de los flocs. Luego, una velocidad de mezcla lenta baja también genera turbiedad ya que al no formarse los flocs las partículas quedan suspendidas en el agua aumentando la turbiedad en el agua.

CONCLUSIONES

- Después de analizar todas las configuraciones de paletas para cada uno de los floculadores, se logro optimizar el proceso de floculación en la planta piloto de la Planta de Tratamiento de Agua potable El Dorado, utilizando las paletas medianas en todos los floculadores.
- Al realizar las mediciones de turbiedad, y comparar las distintas configuraciones en las paletas de los floculadores, se puede corroborar que la turbiedad es un parámetro que mide de forma sencilla la efectividad del proceso de floculación.
- Después de realizar los experimentos pertinentes en la planta piloto, se obtuvo una configuración de paletas diferente a la original, con la que se llego a una turbiedad final menor, lo que asegura que la configuración de paletas en los floculadores que se está usando en este momento no es la óptima.
- En las fotos obtenidas y con los resultados de los diferentes experimentos en cada uno de los procesos se observó que la calidad del agua mejora gradualmente a medida que ésta pasa de una unidad a otra en el tren de tratamiento. De esta forma se concluye que tren del tratamiento actual está funcionando correctamente, eliminado algas y bacterias.
- Al comparar los resultados obtenidos en las dos partes del experimento, se observa como la velocidad podría influir de forma más contundente la eficiencia de la floculación. Esto debido a que cambios en la velocidad genera cambios más significativos en los parámetros a evaluar, como son: gradiente de floculación y turbiedad inicial y final.
- El proceso de floculación en las Plantas de Tratamiento de Agua Potable de Colombia, al igual que otros procesos en el tratamiento de agua potable como sedimentación o filtración, requieren de mayor investigación en cuanto a su diseño y operación, por lo cual para llegar a optimizar éstos procesos de forma más precisa.

RECOMENDACIONES

- La fuente de donde se obtiene el agua que ingresa a la PTAP El Dorado, esta ubicada en una zona con un clima muy variable, de forma que la turbiedad del agua a la entrada de la PTAP, también varía lo largo del año. Por esta razón es necesario hacer con frecuencia experimentos en la planta piloto, con el objetivo de tener una base de datos, donde se relacionen los resultados de los diferentes ensayos con el clima a lo largo del año, la turbiedad del agua de entrada el tipo de paletas que se debe usar por temporada o velocidad a la que deben operar para lograr una remoción de turbiedad mayor que la que se genera, cuando el proceso está funcionando a la velocidad promedio.
- Se debe hacer un estudio más detallado con microscopios de luz polarizada, con el objetivo de corroborar la procedencia de varios tipos de cristales formados por sales disueltas, ya que esto restringió la investigación sobre este tipo de cristales y por ende de los flocs presentes en el agua.
- Se recomienda utilizar la planta piloto para hacer experimentos reales con velocidades más cercanas, a la velocidad óptima obtenida en este trabajo. Esto con el objetivo de optimizar aún más el proceso de floculación, ya que los resultados obtenidos con velocidades extremas, muestran solo la comprobación de la teoría, acerca del uso de diferentes velocidades en este proceso.
- Se recomienda usar con mayor frecuencia la planta piloto para la realización de ensayos y/o experimentos, ya que esta es una aproximación mas real al proceso en comparación con el Test de Jarras el cual se utiliza en la mayoría de las veces en al PTAP EL Dorado para hacer las pruebas.
- Se recomienda programar una inducción acerca de la operación y mantenimiento de la planta piloto, dirigida al personal que trabaja en todos los turnos en la PTAP, con el objetivo de que la planta sea una herramienta útil para el desarrollo de experimentos, dentro de la operación de la planta real.

BIBLIOGRAFIA

1. Martínez A y Rubio D. Análisis de las variables que intervienen en el proceso de coagulación, floculación y sedimentación de la planta de tratamiento el dorado. EAAB e.s.p no publicada Universidad América Bogotá Colombia 2007
2. Millan M. y Quiroz E. Hidráulica de plantas, no publicado Universidad de los Andes Bogotá Colombia 2007.
3. Plazas T Jaime Guillermo Clase tratamiento físico-químico del agua, Universidad de Los Andes Bogotá Agosto –Diciembre 2007
4. Gil Rodríguez Manuel, Procesos de descontaminación de agua, cálculos avanzados informatizados, editorial Thomson 2005
5. Streble Heinz y Kauter Dieter, Atlas de los microorganismos de agua dulce. La vida en una gota de agua, Ediciones Omega S.A, Barcelona 1987.
6. www.dendroworld.co.uk/.../pics/daphniapulex.jpg actualizado en diciembre 15 de 2007
7. Romero Rojas Jairo Alberto, Calidad del Agua, Segunda edición, Editorial Escuela Colombiana de ingenieros.
8. Arboleda Valencia Jorge, Teoría y practica de la purificación del agua, tercera edición Mc Graw Hill.
9. Rios Danilo, Gonzales Elizabeth, López Julieta, Un aporte a la modelación matemática del procesos de floculación en potabilización de aguas, XXVII congreso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental, Noviembre 1 de 2002
10. Brouyer D, Line A, Cokx A, y Do-Quang Z, November (2001), Experimental analysis of floc size distribution and hydrodynamics in a jar-test [version electronica], Institution of Chemical Engineers, 79, 1017-1024.
11. McCurdy Kevin, Carlson Kenneth, Gregory Dean, October (2003), Floc morphology and cyclic shearing recovery: comparison of alum and polyaluminum chloride coagulants [version electronica], Water Research,38, 486-494.
12. <http://epa.gov/> water/ clean water actualizado en Agosto 1 de 2008
13. <http://www.col.ops-oms.org/> actualizado en Octubre de 2007
14. <http://iaqua.es/2008/05/distribucion-mundial-del-agua-del-planeta/> actualizado en Marzo de 2008
15. N.B. Ayibotele. 1992. *The world's water: assessing the resource*. Documento de fondo de la ICWE, Dublín, Irlanda.
16. La información para la descripción de la planta El Dorado y la planta piloto fue suministrada por el Ingeniero Químico Tulio Sánchez