

DESARROLLO DE PARÁMETROS OPERATIVOS PARA TRATAMIENTO DE LODOS EN
LA PLANTA DE POTABILIZACIÓN DE AGUA BOSCONIA DEL ACUEDUCTO
METROPOLITANO DE BUCARAMANGA

Ana María Mora Abril

Jose David Morales Rozo

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingeniería

Bucaramanga

2019

DESARROLLO DE PARÁMETROS OPERATIVOS PARA TRATAMIENTO DE LODOS EN
LA PLANTA DE POTABILIZACIÓN DE AGUA BOSCONIA DEL ACUEDUCTO
METROPOLITANO DE BUCARAMANGA

Ana María Mora Abril

Jose David Morales Rozo

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERÍA AMBIENTAL

Director del Proyecto

Álvaro Andrés Cajigas Cerón

Magister en Ingeniería

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingeniería

Bucaramanga

2019

Agradecimientos

Les agradezco a Dios, a mis padres, familiares y amigos por el apoyo y la confianza que me brindaron durante el desarrollo de mi carrera universitaria. A Naidu por la paciencia y la colaboración que nos tuvo durante el desarrollo de este proyecto. A nuestro director y demás profesores que siempre estuvieron dispuestos a ayudarnos y guiarnos durante toda la carrera y especialmente en este proyecto.

Jose David Morales Rozo.

Agradecimientos

A mi abuelo que en paz descansa le dedico este logro. Me quedo con sus enseñanzas, consejos y buenos recuerdos, y siempre lo llevaré en mi corazón.

Le agradezco a Dios, a mi familia, a mis amigos cercanos y a mi compañero de proyecto por su apoyo y su comprensión en los momentos difíciles; a nuestro director de proyecto, profesores y auxiliares de laboratorio que nos brindaron su ayuda en cada inconveniente que se nos presentó.

Ana María Mora Abril

Tabla de contenido

1	Introducción	12
2	Objetivos	13
2.1	General.....	13
2.2	Específicos.....	13
3	Antecedentes	14
4	Marco contextual.....	16
4.1	Generalidades de la planta	16
5	Marco teórico.....	20
5.1	Propiedades fisicoquímicas de agua	20
5.1.1	Turbiedad	20
5.1.2	pH.....	21
5.1.3	Conductividad	21
5.1.4	Sólidos	21
5.2	Potabilización del agua	23
5.2.1	Coagulación.....	23
5.2.2	Floculación	24
5.2.3	Sedimentación	24
5.2.4	Filtración	25
5.3	Generación de lodos durante el tratamiento de agua potable	26
5.3.1	Sedimentación simple:.....	26
5.3.2	Remoción de hierro y manganeso:	26
5.3.3	Coagulación química:.....	26
5.3.4	Lavado de filtros:.....	27
5.4	Características fisicoquímicas de los lodos producidos en una PTAP.....	27
5.5	Zonas de un sedimentador	29
5.5.1	Sedimentadores laminares	30
5.6	Etapas implícitas en el tratamiento de lodos.....	32
5.7	Ensayos de sedimentación.....	33
5.7.1	Ensayo de velocidad de sedimentación zonal.....	33
5.7.2	Correlación estadística.....	35

6	Metodología.....	38
6.1	Fases Experimentales.....	38
6.1.1	Fase 1. Toma de muestras y generación de la ecuación.....	38
6.1.2	Fase 2. Evaluación de la ecuación con los datos de la planta.....	41
6.1.3	Fase 3. Estudio de sedimentabilidad del lodo	41
7	Resultados y análisis	43
7.1	Fase 1. Toma de datos y generación de la ecuación.....	43
7.2	Fase 2. Evaluación de la ecuación con los datos de planta.....	47
7.3	Fase 3. Estudio de Sedimentabilidad del lodo	51
8	Conclusiones	53
9	Bibliografía	54
10	Anexos.....	56

Lista de figuras

Figura 1. Mezcla rápida - Canaleta Parshall	18
Figura 2. Flocculador.....	18
Figura 3. Sedimentador Número 4.....	19
Figura 4. Filtro Número 9	19
Figura 5. Sedimentador laminar.....	31
Figura 6. Etapas involucradas en el tratamiento de lodos.....	32
Figura 7. Esquema de White y la curva típica asociada para la determinación de la VSZ.....	34
Figura 8. Curva de sedimentación de lodos.....	34

Lista de tablas

Tabla 1. Tipos de sedimentación.....	25
Tabla 2. Características fisicoquímicas de los lodos producidos en una PTAP.....	28
Tabla 3. Estructura de salida.....	30
Tabla 5. Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson.....	36
Tabla 6. Determinación de significancia de una correlación.....	37
Tabla 7. Metodología parámetros medidos.....	39
Tabla 8. Valores de Z con respecto al nivel de confianza.....	40
Tabla 9. Tiempos establecidos para prueba de sedimentabilidad.....	42
Tabla 10. Correlación estadística entre turbiedad y sólidos suspendidos.....	45
Tabla 11. Porcentajes de eficiencia de la ecuación (1).....	47
Tabla 12. Promedio de caudales de lodos en turbiedades bajas-2018.....	48
Tabla 13. Promedio de caudales de lodo en turbiedades altas-2018.....	49
Tabla 14. Concentraciones sólidos sin dilución para pruebas de sedimentabilidad.....	51

Lista de gráficas

Gráfica 1. Sólidos en la entrada del sedimentador.	43
Gráfica 2. Turbiedad del agua cruda y sólidos suspendidos en la entrada del sedimentador.	44
Gráfica 3. Dispersión simple entre Sólidos suspendidos y Turbiedad del agua cruda.....	46
Gráfica 4. Caudales de evacuación de lodos en Turbiedades bajas 2018 y 2019.	49
Gráfica 5. Caudales de evacuación de lodos Turbiedades altas 2018 y 2019.....	50
Gráfica 6. Curva de sedimentación de lodos para el lodo sin diluir.....	52

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DESARROLLO DE PARÁMETROS OPERATIVOS PARA TRATAMIENTO DE LODOS EN LA PLANTA DE POTABILIZACIÓN DE AGUA BOSCONIA DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA

AUTOR(ES): Ana María Mora Abril Jose David Morales Rozo

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): Álvaro Andrés Cajigas Cerón

RESUMEN

Actualmente en la Planta de Potabilización de Agua Bosconia del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga se está construyendo un sistema de tratamiento para los lodos que se producen en las etapas de potabilización del agua. Con este proyecto se buscó establecer los parámetros de operación para la fase de tratamiento de lodos. Fueron determinados parámetros de sólidos totales, sólidos suspendidos y disueltos que junto con la turbiedad medida en planta permitió la generación de la ecuación mediante el software estadístico IBM (International Business Machines) SPSS (Statistical Product and Service Solutions) Statistics. Se analizó el comportamiento histórico de la turbiedad y el caudal tratado en la planta para dos años (2018-2019) que permitió predecir los caudales producidos de lodos y tiempos de operación de la planta de lodos. Por último, este proyecto determinó los tiempos de operación para épocas de turbiedades bajas de 14 a 15 horas y para épocas de turbiedades altas de 23 a 24 horas. También se encontró que el lodo tiene tiempos de sedimentabilidad menor a 10 minutos, sin importar la dilución en la que se encuentren, esto ayudará a reducir la duración del tratamiento y por consiguiente aumentar los caudales mínimos de operación.

PALABRAS CLAVE:

Producción, lodos, turbiedad, sólidos suspendidos, parámetros

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DEVELOPMENT OF OPERATING PARAMETERS FOR MUD TREATMENT IN THE BOSCONIA WATER POTABILIZATION PLANT OF THE BUCARAMANGA METROPOLITAN AQUEDUCT

AUTHOR(S): Ana María Mora Abril Jose David Morales Rozo

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: Álvaro Andrés Cajigas Cerón

ABSTRACT

Currently, a treatment system for sludge that occurs in the stages of water purification is being built at the Bosconia Water Treatment Plant of the Bucaramanga Metropolitan Aqueduct. This project sought to establish the operating parameters for the sludge treatment phase. The parameters of total solids, suspended and dissolved solids were determined, which together with the turbidity measured in the plant allowed the generation of the equation by means of the statistical software IBM (International Business Machines) SPSS (Statistical Product and Service Solutions) Statistics. The historical behavior of the turbidity and the flow rate treated in the plant for two years (2018-2019) that allowed to predict the sludge flows produced and operation times of the sludge plant were analyzed. Finally, this project determined the operating times for times of low turbidity from 14 to 15 hours and for times of high turbidity from 23 to 24 hours. It was also found that the sludge has settling times of less than 10 minutes, regardless of the dilution they are in, this will help reduce the duration of treatment and therefore increase the minimum flow rates of operation.

KEYWORDS:

Production, sludge, turbidity,
suspended solids, parameters

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

Introducción

En Colombia la normatividad de vertimientos, aplicada por las corporaciones autónomas, buscan garantizar el cumplimiento de la disposición de lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua potable, provocando que los gestores implementen procedimientos para obtener unos efluentes que no generen impactos negativos en el cauce.

En las plantas convencionales de potabilización de agua solo se gestionaba la producción del agua potable sin tener en cuenta la generación de lodos en todos los procesos, debido a que estos están conformados por sustancias que componen las aguas naturales, normalmente sustancias inorgánicas como arcillas, arenas finas o limos. Estos lodos debido a su gran contenido de metales producto de la coagulación y carbón activado (en caso de emplearse en el proceso) causan impactos negativos al ser vertidos en la fuente, poniendo en riesgo su uso a largo plazo. (Ramírez Quirós, Lodos producidos en el tratamiento del agua potable, 2008)

La Planta de Agua Potable de Bosconia iniciará el proceso de tratamiento de lodos recolectados durante los lavados de los filtros y la sedimentación, para realizar un estudio en los lodos del sedimentador, con el fin de proyectar el comportamiento de la masa en el sistema, evaluando las condiciones que se presentan en los sedimentadores para la construcción de la curva de salida de lodos, a partir de una ecuación en términos de turbiedad que se formulará con los datos obtenidos durante el desarrollo del proyecto; esta busca predecir la producción de lodos durante esta etapa, y así saber la cantidad de sólidos suspendidos totales que entrarán a la planta, así mismo se analizará la sedimentabilidad de estos lodos en diferentes concentraciones.

Objetivos

1.1 General

- Establecer los parámetros de operación para la fase de tratamiento de lodos que se encuentra en construcción en la Planta de Agua Potable Bosconia.

1.2 Específicos

- Establecer una ecuación de correlación turbiedad de entrada - sólidos suspendidos del sistema en la etapa de sedimentación de la planta.
- Evaluar la aplicabilidad de la ecuación para el cálculo del caudal de operación de la planta de lodos en condiciones reales.
- Identificar el comportamiento del espesamiento en cuatro concentraciones diferentes de lodo.

Antecedentes

En Colombia, la información publicada en torno a experiencias de reutilización y tratamiento de los lodos provenientes de PTAP es escasa. En tres PTAP de ciclo convencional de diferentes ciudades del país, se realiza el tratamiento de estos lodos donde prima el tratamiento físico por medio de la deshidratación, mientras que en el municipio de Caldas (Antioquia) se cuenta con una planta piloto para el tratamiento de lodos donde se espesan por medio de polímeros hasta su secado para su posterior disposición (Gutiérrez Rosero, Ramírez Fajardo, Rivas, Linares, & Paredes, 2014).

Hay un inconveniente principal a nivel nacional, y es la poca información existente para guiar a las entidades que manejan estos residuos y darles bases para iniciar una planeación en torno al tema, la cual permita identificar las ventajas de aplicar este tipo de tratamientos en las plantas de agua potable. Actualmente estos lodos son dispuestos sin ningún tratamiento en represas, terrenos baldíos o en las mismas fuentes de suministro ocasionando serios inconvenientes de consideración ambiental, como es el caso de Cartagena, en donde varias zonas, debido a la sedimentación, cerraban las ciénagas impidiendo la aireación de las mismas (Torres J. N., 2013).

En el año 2003 en el municipio de Cartago, Valle se realizó un estudio donde se buscaba proponer un sistema para el manejo de los lodos producidos en la planta de tratamiento de agua potable. Se relacionaron la turbiedad y la cantidad de sólidos presentes en el agua cruda para un periodo de 3 años, sin embargo, debido a que las variables no tenían un comportamiento definido fue imposible correlacionarlas, no obstante, se determinó la producción de lodos en las diferentes condiciones climáticas y se llegó a valores promedios de carga. Se propuso un sistema de tratamiento de lodos basado en la evacuación de los lodos de los sedimentadores por gravedad o

bombeo, seguido de un sistema de deshidratación por lechos de secado aprovechando las condiciones climáticas de esta zona (Ramirez Fernández, 2003).

Un estudio realizado por la Pontificia Universidad Javeriana en el 2013 desarrolló una metodología para estimar la concentración de sólidos suspendidos totales en tiempo real en hidrosistemas urbanos a partir de mediciones de Turbiedad. Este estudio se realizó en el río arzobispo de la localidad de Teusaquillo en Bogotá en donde se tomaron un total de 46 muestras en distintos días de la semana y en distintas condiciones climáticas. Donde se obtuvo una ecuación que estimaba la concentración de sólidos suspendidos en función de la turbiedad medida (Torres A. , 2013).

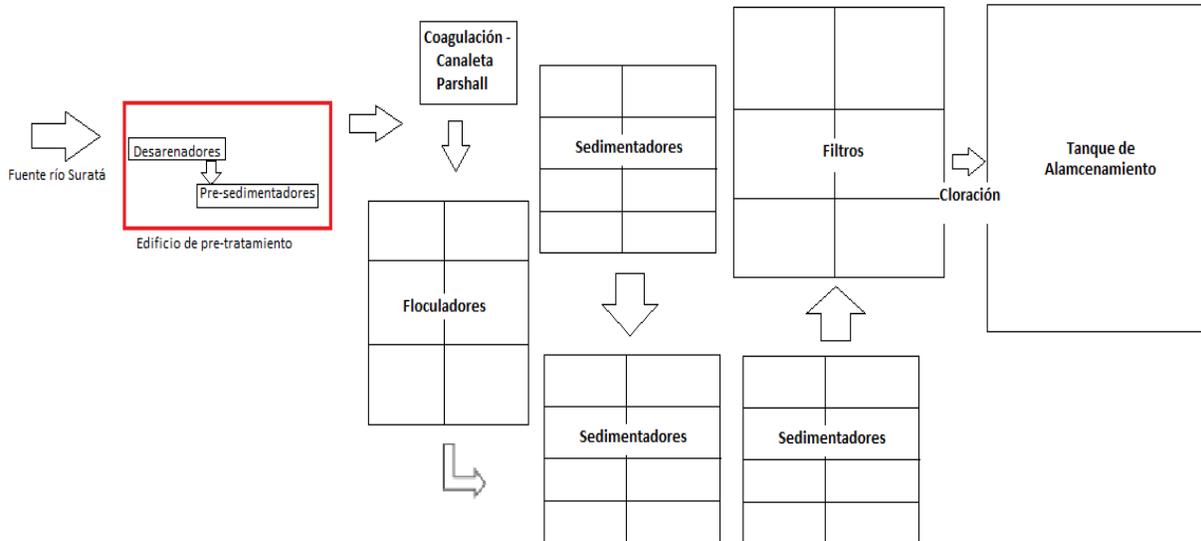
El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. en su primer informe para el estudio y diseño del sistema de extracción y conducción de lodos de la planta de tratamiento de agua potable Bosconia hasta la planta de lodos (2010), determinó los promedios anuales de turbiedades y caudales para un periodo comprendido entre el año 2006 y 2009. El balance encontrado fue: Una turbiedad promedio anual de 126,43 UNT y un caudal promedio anual de 471,08 L/s. Se relacionó Turbiedad para el Agua Cruda de Bosconia y SST, se hizo la correlación estadística entre estas variables y se calculó la ecuación ($Y = 0,679X + 91,4$; Y: Sólidos suspendidos; X: Turbiedad) que por mínimos cuadrados se ajustó más a los valores, teniendo eficiencias de remoción entre 80 y 85% de SST. (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga- AMB, 2010).

Marco contextual

1.3 Generalidades de la planta

La planta está localizada en la vía que conduce de Bucaramanga, al municipio de Matanza, al Nororiente de la ciudad, entre las cotas topográficas 685 y 675 msnm. Esta planta opera 24 horas al día, durante los 7 días de la semana, y recibe agua proveniente del río Suratá. Tiene una capacidad de 2000 l/s, y es del tipo convencional con tanques desarenadores, presedimentadores, coagulación, mezcla rápida, floculación mecánica, sedimentación, filtración y cloración (ver ilustración 1) (AMB, 2017). Tren de tratamiento que es descrito en este capítulo. Cuenta con un laboratorio completo para realizar pruebas como: determinación de dosis óptima de coagulante a suministrar, concentración de mercurio entrante a la planta (parámetro que debe ser medido en este caso por actividades de minería que se realizan en esta zona), y mediciones de parámetros físico-químicos como, pH, conductividad, Oxígeno Disuelto, Turbiedad, entre otros

El AMB S.A. ESP presta el servicio público domiciliario de acueducto a 277.622 suscriptores de Bucaramanga, Floridablanca y Girón.



*Ilustración 1. Plano de planta de tratamiento Bosconia.
Fuente. Autores*

La planta cuenta con 4 floculadores mecánicos, los cuales conducen el agua directamente a un sedimentador específico, a través de canales que están conectados entre sí, formando líneas de operación cuya finalidad es mantener en funcionamiento la planta en caso que ocurra una falla o se esté realizando mantenimiento en alguno de los procesos. Cuenta con 4 sedimentadores, 12 filtros y un tanque de almacenamiento de agua tratada con capacidad de 10.000 m³ para cubrir la demanda de agua al municipio.



*Figura 1. Mezcla rápida - Canaleta Parshall
Fuente. Autores*



*Figura 2. Floculador.
Fuente. Autores*



Figura 3. Sedimentador Número 4
Fuente. Autores



Figura 4. Filtro Número 9
Fuente. Autores

Marco teórico

1.4 Propiedades fisicoquímicas de agua

Son características que lleva el agua, los cuales se deben identificar por medio de análisis de laboratorio, con el fin de que cumpla con los rangos permisibles para el consumo humano. Dentro de los parámetros que se evalúan constantemente están la turbiedad, pH, conductividad, oxígeno disuelto y sólidos.

1.4.1 Turbiedad

Una característica física importante del agua es la turbiedad o turbidez, cuya percepción óptica está regida por la Ley de Beer (relaciona la absorción de luz con las propiedades del material atravesado), resultante de la dificultad del paso de la luz a través de una muestra de agua. Está causada por sustancias y material no soluble en suspensión (entre 1 y 1.000 nanómetros-nm). (Lozano-Rivas & Lozano Bravo, 2015)

Según Lozano Rivas & Lozano Bravo “la turbiedad es una medida indirecta de la cantidad de partículas coloidales en suspensión en una muestra de agua”. Los procesos erosivos causados por deforestación, el transporte de sedimentos en épocas donde el cauce aumenta, así como vertimientos industriales, domésticos o agropecuarios, son estos los procesos de los cuales pueden originarse estas partículas.

El nivel de turbiedad se expresa en UNT (Unidades Nefelométricas de Turbiedad). Según la normativa colombiana, el agua para consumo humano no podrá sobrepasar el valor máximo de 2 UNT (MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2007).

1.4.2 pH

El pH indica la acidez o alcalinidad del agua, sus mediciones se ejecutan de 0 a 14, considerándose 7 como neutro, las soluciones con un pH por encima a 7 se consideran ácidas y las soluciones con pH por encima de 7 son bases o alcalinas. Ésta es una característica que influye en la aplicación de tratamientos químicos para el agua y que influye con la operación en la planta, debido a que el valor del pH puede influir en la eficiencia del coagulante o floculante (Vera B., 2007). En un pH alcalino se pueden producir problemas de incrustaciones a causa de la dureza, que causa problemas como la formación de sarro precipitado en las tuberías y accesorios. El agua con pH menor a 6,5 puede ser corrosiva y puede causar daños en la tubería y accesorios de plomería (Giraldo G, 1995).

1.4.3 Conductividad

La conductividad es la propiedad que presentan las soluciones para conducir el flujo de la corriente eléctrica, depende de la presencia de iones, su concentración y la temperatura de medición. Los iones provienen principalmente de sales en la fuente, a mayor número de sales y ácidos existirá mayor número de iones y por lo tanto aumentará la conductividad. Esta característica se mide en micro Siemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{Cm}$). La conductividad del agua potable tiene un rango de 50 a 1500 $\mu\text{S}/\text{Cm}$. Representa la concentración de sales en aguas naturales, así como describir las variaciones de los sólidos disueltos (Giraldo G, 1995).

1.4.4 Sólidos

Los sólidos son materiales suspendidos y disueltos en el agua. Pueden afectar negativamente a la calidad del agua o al suministro de varias maneras. Los análisis de sólidos son importantes en el

control de procesos de tratamientos biológico y físico de aguas residuales y para evaluar el cumplimiento de las limitaciones que regulan su vertimiento. El contenido de materia en suspensión es muy variable según los cursos de agua. Para cada uno de ellos está en función de la naturaleza de los terrenos atravesados, de la estación, la pluviometría, los trabajos, los vertimientos etc.

Los “sólidos totales” se definen como la materia que permanece como residuo después de la evaporación y secado a 103 - 105 °C. El valor de los sólidos totales incluye materias disueltas (sólidos disueltos totales: porción que pasa a través del filtro) y no disuelto (sólidos suspendidos totales: porción de sólidos totales retenidos por un filtro).

Los sólidos secados entre 103 - 105 °C pueden retener aguas de cristalización y también algo de agua ocluida. Como resultado de la conversión del bicarbonato en carbonato, habrá una pérdida de CO₂. La pérdida de material orgánico por volatilización será por lo general muy ligera. Los análisis de sólidos son importantes en el control de procesos de tratamiento biológico y físico de aguas residuales y para evaluar el cumplimiento de las limitaciones que regulan su vertimiento.

Es una variable utilizada en el cálculo del Índice de calidad, ICA del IDEAM para conocer la posible aptitud de uso del recurso hídrico superficial (IDEAM, 2007) .

Hasta hace muy pocos años sólo se gestionaba la producción de agua potable, no prestando mucha atención a los lodos que se producían, tanto en los decantadores como en el lavado de los filtros, considerando que en definitiva estos lodos estaban formados por las sustancias que ya llevaban las aguas naturales o aguas brutas, generalmente inorgánicas, como arcillas, arenas finas o limos.

Hoy en día las aguas naturales se han ido degradando por diferentes circunstancias, y a la vez hay una mayor mayor medioambiental y legislativo, que está provocando que los representantes de los abastecimientos implementen sistemas de tratamiento de lodos con objeto de extraer la mayor parte de sólidos y obtener unos efluentes sin lodos que podrán ser vertidos al cauce. (Quirós, 2008)

Los residuos retenidos en los sedimentadores son lodos que se obtienen en la coagulación, como son los óxidos de aluminio, junto con materias de naturaleza orgánica e inorgánica, arrastradas por el agua y se van extrayendo periódicamente e intermitentemente del fondo de los sedimentadores. La mayor parte de las materias arrastradas por las aguas superficiales son inorgánicas, como arcillas, arenas finas y limos. (Quirós, 2008)

1.5 Potabilización del agua

La potabilización del agua es un proceso físico-químico y biológico por el cual se transforma agua cruda en agua apta para el consumo humano. Durante este proceso se eliminan sustancias y microorganismos que afecten la calidad dell agua evitando así generar problemas de salubridad a las comunidades que se abastecen de este recurso. Antes de su tratamiento el agua cruda se es sometida a un pretratamiento, en el cual se busca separar gran cantidad de sustancias y materias, que puedan causar problemas para los procesos siguientes. (Torres J. N., 2013).

1.5.1 Coagulación

El agua cruda está compuesta por sustancias disueltas y en suspensión, estas pueden ser de gran tamaño y densidad, por lo tanto, se pueden eliminar por sedimentación, sin embargo, algunas partículas son muy pequeñas, lo que impide su aglomeración y sedimentación. Para lograr que

estas partículas se aglomeren y formen otras más grandes el agua es sometida a un proceso de coagulación, en el cual ocurre una desestabilización de las partículas por adición de sustancias químicas por medio de una unidad para dosificación y mezcla rápida.

1.5.2 Floculación

Posterior a la etapa de coagulación se encuentra la floculación, durante este proceso, se realiza una mezcla lenta en donde las partículas incrementan las colisiones formando flóculos de mayor tamaño. La floculación requiere menor gradiente de agitación que la mezcla rápida con el fin de impedir la ruptura de los flóculos ya formados y luego someterlos a la etapa de sedimentación (Romero Rojas, 2000).

1.5.3 Sedimentación

Cuando termina la etapa de floculación se deben separar las partículas sólidas de la fase líquida por medio de la sedimentación. Este es un proceso netamente físico, que consiste en la separación de partículas por efecto de la gravedad, en el cual se remueven las partículas más densas aprovechando su velocidad de caída y dejando las más finas y con una densidad muy cercana a la del agua para ser removidas durante la filtración (Maldonado Y V. , 2004).

La sedimentación ocurre de maneras diferentes, según la naturaleza de lo sólidos, su concentración y su grado de floculación. En el agua existen partículas discretas y floculentas, de acuerdo a estas características se consideran los siguientes tipos de sedimentación.

Tabla 1. Tipos de sedimentación.

TIPO DE SEDIMENTACIÓN	CARACTERÍSTICAS DE LOS SÓLIDOS	CARACTERÍSTICAS DE LA SEDIMENTACIÓN	TIPOS DDE UNIDADES DE TRATAMIENTO
I DE PARTÍCULAS DISCRETAS	Partículas discretas y aisladas en soluciones diluidas	Cada una de las partículas sedimenta de forma independiente sin interacciones entre ellas ni con el fluido que las contiene	Desarenadores, dársenas de sedimentación o pre sedimentadores
II DE PARTÍCULAS FLOCULENTAS	Partículas (coloides) floculentas o aglomerables	Las partículas se van aglomerando y forman coágulos o flóculos de mayor tamaño y peso	Sedimentadores de agua potable (con coagulación-floculación) y decantadores de aguas residuales
III ZONAL O INTERFERIDA	Suspensiones de sólidos aglomerables de concentración intermedia	La sedimentación es interferida dada la cercanía entre partículas y se comportan como un bloque	Sedimentadores y decantadores de flujo ascendente y de manto de lodos
IV POR COMPRESIÓN	Suspensiones de alta concentración	Las partículas están en contacto íntimo entre ellas y su peso forma una masa compactada en el fondo de las unidades	Compactación de lodos en sedimentadores y en unidades de espesamiento de aguas residuales

Fuente (Lozano-Rivas & Lozano Bravo, 2015)

1.5.4 Filtración

La filtración es requerida para la producción de agua clara y cristalina, alrededor del 90% de turbiedad y color se elimina por medio de la coagulación-floculación y sedimentación, sin embargo, cierta cantidad de floc se debe retener por la filtración a través de medios porosos generalmente arena, arcilla y antracita. Por último, el agua pasa por un proceso de desinfección, generalmente con cloro que tiene como finalidad remover microorganismos patógenos que todavía se encuentren en el agua tratada (Romero Rojas, 2000).

1.6 Generación de lodos durante el tratamiento de agua potable

Durante del proceso de potabilización del agua la mayor parte de los lodos se originan durante los procesos de sedimentación entre el 60 y 70% y filtración entre el 30% y 40% (Torres J. N., 2013). Los lodos también se producen durante otros procesos como el lavado de filtros.

1.6.1 Sedimentación simple:

Durante la sedimentación simple se busca separar la arena fina, arcillas, limos y residuos orgánicos vegetales por medio de un desarenador, el cual coloca seguido a la bocatoma. Los sólidos se precipitan formando una capa de lodos que debe ser retirado de manera continua o esporádica por medio de dragado.

1.6.2 Remoción de hierro y manganeso:

En las plantas donde existe remoción de estos metales, los lodos se componen principalmente de hidróxido férrico y de óxidos mangánicos. Por lo general estos lodos tienen un volumen menor al que se obtiene de los sistemas de tratamiento convencionales.

1.6.3 Coagulación química:

En la mayoría de los casos el lodo generado en los procesos de sedimentación y filtración está constituido por precipitados de aluminio o hierro, que son obtenidos como resultado de la adición de alumbre o sales de hierro en el proceso de coagulación.

1.6.4 Lavado de filtros:

Como resultado de esta operación se obtiene un agua residual con concentración baja de sólidos, los cuales fueron retenidos durante la filtración. La cantidad puede ser del orden del 2% al 6% del agua filtrada y este porcentaje puede variar dependiendo del tipo de pretratamiento y del tipo de filtro (Romero Rojas, 2000).

1.7 Características fisicoquímicas de los lodos producidos en una PTAP

Estos lodos están compuestos principalmente por materias que estaban presentes en el agua bruta y que por el efecto de la oxidación, coagulación y precipitación son retenidos en las unidades de sedimentación y filtración; así como otros reactivos que en ocasiones se emplean en el tratamiento como la cal, permanganato y carbón (SASTOQUE PERILLA , 2015). Las características de los lodos varían dependiendo de la calidad del agua cruda y del tratamiento aplicado. Por lo general las sustancias que contiene el agua cruda son inertes como arcillas, arenas, etc. Aunque también están sustancias orgánicas como el plancton y otros microorganismos (ALDANA TIQUE & PÉREZ ROJAS, 2017).

El lodo tiene un contenido entre 1-6% de sólidos, por esto la disposición de este pequeño volumen de sólido necesita del manejo de un gran volumen de lodo. El volumen del lodo depende principalmente de su contenido de agua, para su tratamiento se debe concentrar los sólidos por medio de la máxima remoción de agua y en la reducción de su contenido orgánico. La cantidad de lodo producido varía dependiendo del proceso de tratamiento usado (Quirós, 2008).

Tabla 2. Características fisicoquímicas de los lodos producidos en una PTAP.

Proceso	%Humedad del lodo		Densidad relativa	
	Intervalo	Típico	Sólidos	Lodo
Sedimentación primaria	88-96	95	1,4	1,02
Filtro percolador	91-95	93	1,5	1,025
Precipitación química	-	93	1,7	1,03
Lodos activados	90-93	9	1,3	1,005
Tanques sépticos	-	93	1,7	1,03
Tanques Imhoff	90-95	90	1,6	1,04
Aireación prolongada	88-92	90	1,3	1,015
Lodo primario digerido anaerobiamente	90-95	93	1,4	1,02
Laguna aireada	88-92	90	1,4	1,01
Lodo primario digerido aerobiamente	93-97	96	1,4	1,012

Fuente. (Romero Rojas, 2000).

1.8 Zonas de un sedimentador

Existen distintos tipos de sedimentadores dependiendo de cómo estén diseñadas las 4 zonas en las que se dividen, las cuales se explican a continuación.

Zona de entrada:

Con el fin de no romper el floc que entra al sedimentador se debe tener en cuenta que la estructura de entrada debe distribuir el agua de manera uniforme en toda el área transversal del sedimentador, evitar chorros que generen movimientos en el tanque, disipar la energía con la que viene el agua y evitar que el agua entre a velocidades muy altas, la velocidad de entrada debe ser en lo posible menor a 155 cm/s. (Arboleda Valencia, 2000)

Zona de sedimentación:

Esta zona es la más compleja, en el momento de su diseño se debe tener en cuenta la forma de los sedimentadores, velocidad horizontal, tiempo de retención y carga superficial. La velocidad debe ser la misma en todos los puntos. (Arboleda Valencia, 2000)

Zona de lodos:

Consta de una tolva con la capacidad para depositar el lodo con una tubería y válvula para evacuarlos, en caso de tener una recolección de forma mecánica. En tanques circulares el fondo es inclinado hacia el centro en donde está ubicado el sumidero para recolectar los lodos. (Maldonado Y V. , 2004)

Zona de salida:

En la zona de salida existen gran variedad de estructuras como se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3. Estructura de salida.

Estructura	Clasificación
Vertederos de rebose	Lisos
	Dentados
Canaletas de rebose	Lisas
	Dentadas
	Con orificios
Orificios	Circulares
	Cuadrados

Fuente. (Arboleda Valencia, 2000).

Si la velocidad de salida aumenta es posible que haya re suspensión del floc ya sedimentado, para evitar esto se debe mantener controlado el nivel de agua en el sedimentador (Arboleda Valencia, 2000).

1.8.1 Sedimentadores laminares

Este mecanismo no necesita de energía eléctrica para su operación y además tienen la capacidad de tratar mayores caudales en estructuras y áreas menores

También reciben el nombre de placas inclinadas, laminares, de alta rata o de flujo laminar. En estas unidades, el agua ingresa por la parte baja de la estructura y asciende a través de placas inclinadas a 60° (respecto de la horizontal), para ser posteriormente recolectada en la parte superior mediante estructuras de rebose (Lozano-Rivas & Lozano Bravo, 2015). El grado de inclinación de estas placas favorece la auto limpieza por efecto de la gravedad. En 1970, Yao desarrolló casi la totalidad del soporte teórico de la sedimentación laminar (Yao, 1970).

Su alta eficiencia, respecto de los sedimentadores convencionales, obedece en gran parte a que los sedimentadores laminares trabajan con flujos laminares correspondientes a un Número de Reynolds “ R_e ” entre 100 y 500, mientras que los convencionales funcionan con valores entre 10.000 y 250.000, que corresponde a un régimen turbulento.

Las placas usadas en la actualidad, pueden ser:

- Placas angostas: 1,20 m de alto y 2,40 de ancho (aproximadamente).
- Placas profundas: 1,20 a 1,50m de ancho y 2,40 a 3,20m de profundidad.

(Lozano-Rivas & Lozano Bravo, 2015)

Esta unidad consiste en la instalación de placas paralelas en la zona de sedimentación y así lograr una gran superficie para depositar los lodos y con esto disminuir considerablemente el área superficial de estos tanques. Para su construcción los materiales que más se usan es el asbesto-cemento, la fibra de vidrio, lonas de vidrio reforzadas con poliéster y plástico. (Maldonado Y V. , 2004)

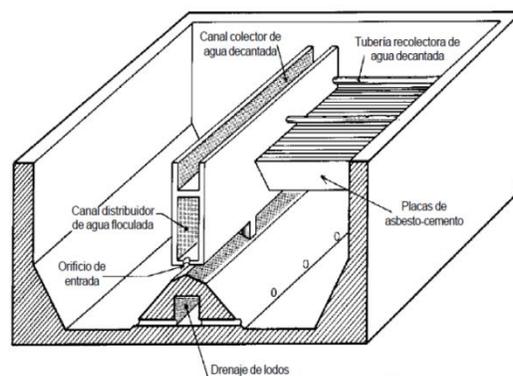


Figura 5. Sedimentador laminar.
Fuente. (Maldonado Y V. , 2004)

1.9 Etapas implícitas en el tratamiento de lodos

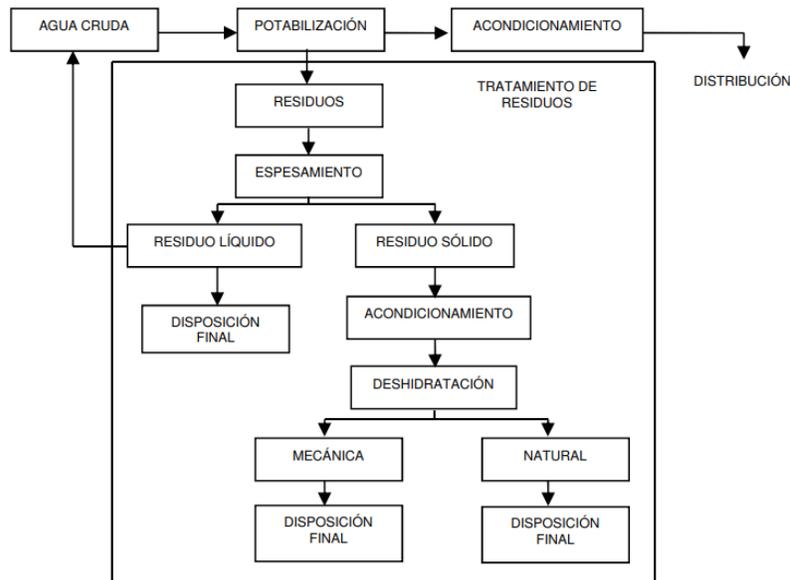


Figura 6. Etapas involucradas en el tratamiento de lodos.
Fuente. (Escobar R., 2004)

El espesamiento por flotación se beneficia de la flotabilidad de las partículas (flóculos) cuando se les adhieren pequeñas burbujas de aire que permite elevarlas hasta la superficie del tanque y donde el lodo flotado y espesado es retirado de la superficie mediante frascetas superficiales. El espesamiento del lodo se ve favorecido mediante el empleo de un adecuado polímero. La concentración del lodo en materia seca tras esta fase de espesamiento suele estar en el entorno del 3 - 4 % (30 - 40 gr/l). (Ramírez Quirós, Lodos producidos en el tratamiento del agua potable, 2008)

Para la deshidratación es necesaria la extracción del agua retenida en el lodo, la cual puede ser de manera mecánica o natural mediante sistemas de desagüe y secado, lechos de secado, filtros de vacío, centrifugas, lagunas de secado, prensas filtro y prensas filtro de correa.

Una vez reducido el porcentaje de agua deseada en los lodos se busca el mejor método de disposición como rellenos sanitarios, lagunas para su disposición o propósitos agrícolas en el

caso de contener cal para la neutralización de suelos ácidos. (Ramírez Quirós, Lodos producidos en el tratamiento del agua potable, 2008)

1.10 Ensayos de sedimentación

La velocidad de sedimentación depende de las características del agua, las características hidráulicas de los sedimentadores y de la y de los procesos anteriores en la planta. Para predecir la eficiencia de remoción de los sólidos en suspensión en función de la concentración de partículas o velocidad de sedimentación se recurre a ensayos de sedimentación en laboratorios (Perez, 1997).

1.10.1 Ensayo de velocidad de sedimentación zonal

Esta sedimentación se presenta en sedimentadores que poseen concentraciones de sólidos suspendidos superiores a 500 mg/L, en donde las partículas se encuentran en distancias muy reducidas y se sedimentan masivamente, conformando una superficie de separación entre los flocs y el sobrenadante (OLIVA & GIACOMA, 2008).

El equipo en el que se lleva a cabo este ensayo consiste en un cilindro vertical transparente, en el que se dispone el lodo. Posteriormente se agita y se comienza a medir el tiempo y la altura en la que se encuentran los sólidos. Después de unos minutos se forma una interface que separa la fase líquida o sobrenadante del lodo sedimentado (sedimento). Con el paso del tiempo el lodo suspendido pasa a ser parte del lodo concentrado, y es por esto que en el fondo del cilindro se encuentra lodo con una alta concentración sólidos suspendidos.

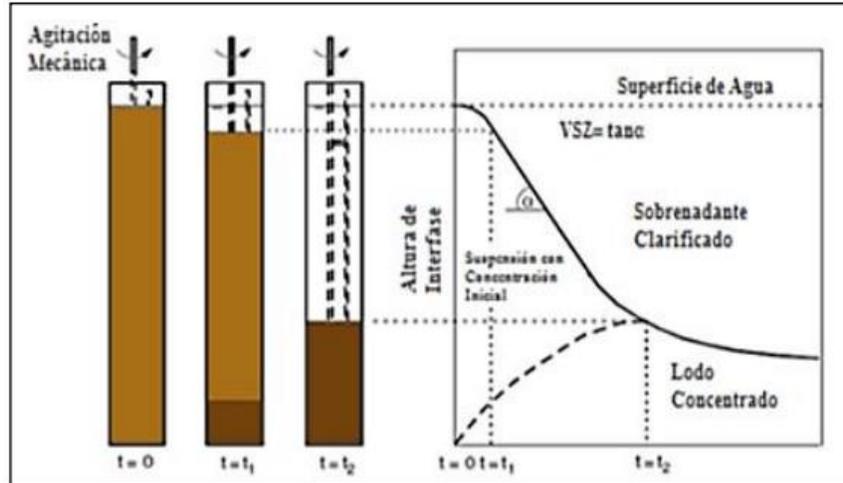


Figura 7. Esquema de White y la curva típica asociada para la determinación de la VSZ.
Fuente. (Van Haandel & Marais, 1999)

Dentro de los modelos más conocidos para relacionar la velocidad de sedimentación y la concentración de lodos, está el modelo desarrollado por Vesilind (1968), el cual ofrece una buena descripción del comportamiento de la sedimentabilidad de los lodos (Agudelo Patiño & Alvear Daza, 2015).

Al medir la altura de la capa superior de los lodos se obtiene una curva como se presenta en la figura 8.

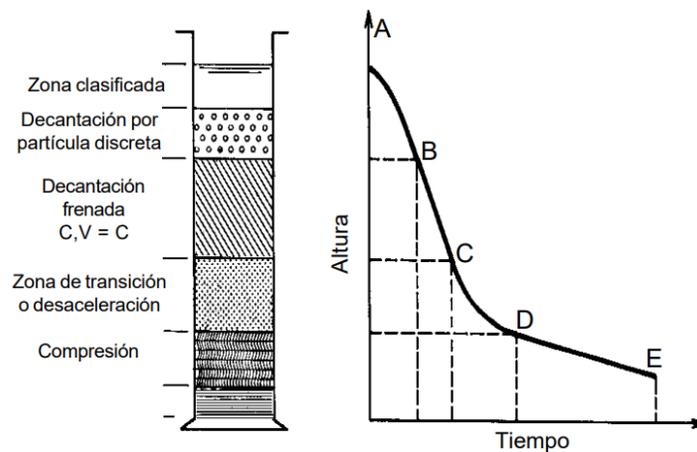


Figura 8. Curva de sedimentación de lodos.
Fuente. (Maldonado Y V. , 2004).

La curva de sedimentación de lodos presenta las siguientes características, dependiendo de las zonas en las que está dividida. En la zona A-B se presenta una coalescencia de los flóculos, seguida de una pequeña caída libre, generalmente esta zona no se produce. La zona B-C se le denomina zona de decantación frenada, esta corresponde a una velocidad de caída constante, la cual está definida por el tipo de floculación y la concentración de partículas, al incrementarse la concentración inicial de partículas la velocidad disminuye. En la zona C-D se produce una disminución progresiva de la velocidad de caída, y se la denomina zona de desaceleración o transición. Por último se encuentra la zona D-E en la que los flóculos se tocan y ejercen presión sobre las capas inferiores, se le denomina zona de compresión (Maldonado Y V. , 2004).

1.10.2 Correlación estadística

La correlación es una técnica que se usa para determinar la relación que existe entre dos o más variables. Su finalidad es analizar la dirección y fuerza entre las variables, y así conocer su intensidad de relación. Para cuantificar el grado de asociación entre las variables se usa el coeficiente de correlación, frecuentemente se usa el coeficiente de correlación de Pearson el cual evalúa la asociación lineal de 2 variables, puede variar desde -1 a 1 (Laguna, 2017).

Tabla 4. Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson.

Valor del coeficiente de Pearson = R	Interpretación
R = 1	Correlación perfecta
R mayor a 0,9 y menor a 1	Correlación excelente
R entre 0,8 y 0,9	Correlación aceptable
R entre 0,6 y 0,8	Correlación regular
R entre 0,3 y 0,6	Correlación mínima
R menor a 0,3 y mayor a 0	No hay correlación

Fuente. (Bencardino, 2012).

Así como el análisis de correlación permite medir la fuerza de asociación entre dos variables, el análisis de regresión permite la predicción o sea la estimación de un valor o promedio de una variable denominada dependiente, con base en un valor o promedio supuestamente conocido para la otra variable, denominada independiente.

Este análisis de regresión, da lugar a una ecuación que nos permite describir a relación existente entre las dos variables. Es decir, obtener una línea ideal conocida como línea de regresión, que nos describa la relación o dependencia entre las dos variables.

El nivel de significancia (o nivel de α) es un umbral que permite determinar si el resultado de un estudio se puede considerar estadísticamente significativo después de realizar las pruebas estadísticas planificadas. Este nivel suele establecerse en un 5% (0,05), aunque se pueden usar otros niveles en función del estudio. Esto representa la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando es verdadera.

Para determinar si la correlación entre las variables es significativa, se debe comparar el valor p con su nivel de significancia, este valor indica si el coeficiente de correlación es significativamente diferente de 0. (Un coeficiente de 0 indica que no existe una relación lineal).

Tabla 5. Determinación de significancia de una correlación

Condición	Descripción
La correlación es estadísticamente significativa	Si el valor p es menor que o igual al nivel de significancia, entonces se puede concluir que la correlación es diferente de 0.
La correlación no es estadísticamente significativa	Si el valor p es mayor que el nivel de significancia, entonces se no puede concluir que la correlación es diferente de 0.

Fuente: (Bencardino, 2012)

Metodología

Este proyecto se llevó a cabo en la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia, perteneciente al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.

La toma de muestras se realizó en la entrada y la salida del sedimentador número 4, así como en la purga de dicho sedimentador. Cada muestra fue recolectada siguiendo el instructivo para la toma de muestras de aguas residuales (IDEAM, 2007)

1.11 Fases Experimentales

En relación con los objetivos planteados se establecieron 3 fases experimentales.

1.11.1 Fase 1. Toma de muestras y generación de la ecuación

En esta fase se recolectaron datos de caudal y concentración a la entrada del sedimentador, salida del agua clarificada y de la purga de lodos (salida de lodos). En cada uno de estos puntos se midieron parámetros de pH, conductividad y oxígeno disuelto; estas mediciones iniciaron a tomarse una hora después de finalizada la purga de lodos, a partir de esta se tomaron muestras con intervalos de una hora hasta llegar a la siguiente purga del sedimentador (la purga se realiza cada 8 horas), estas muestras fueron inmediatamente preservadas en cadena de frío y luego trasladadas a los laboratorios de la facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana donde se determinaron a nivel de laboratorio sólidos totales, sólidos disueltos y suspendidos, con estos últimos datos y la turbiedad de entrada se realizó la correlación para obtener la ecuación que permite estimar la masa de lodos en el sistema.

Los parámetros medidos y su metodología se reportan en la tabla 7.

Tabla 6. Metodología parámetros medidos.

Parámetro	Metodología	Referencia	Frecuencia de toma de muestra
Turbiedad	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater	2130 B. Método Nefelométrico	Cada hora
Sólidos totales	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater	2540 B. Sólidos Totales secados a 103–105 ° C	Cada hora
Sólidos Suspendidos	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater	2540 E. Sólidos fijos y volátiles encendidos a 550 ° C	Cada hora
Sólidos Disueltos	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater	2540 C. Sólidos totales disueltos secados a 180°C	Cada hora
pH	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater	4500-H ⁺ B. Método Electrométrico	Cada hora

Fuente. Autores.

En el cálculo del tamaño de muestra se utilizó la siguiente fórmula:

$$n = \frac{Z^2 PQ}{E^2}$$

Por lo general se aceptan errores no mayores a 6%, en este caso se escogió un porcentaje de error de 5%. Otro elemento a tomar en cuenta en el momento de aplicar la fórmula de muestreo es la “variabilidad positiva” (p) y la “variabilidad negativa” (q), ambas son complementarias, es decir, que su suma es igual a 1. En caso de no tener investigaciones previas, como lo fue en este caso, se toman ambas variables con 0,5, con lo cual se obtiene el máximo valor posible de n . Los valores de Z dependen del nivel de confianza escogido por el investigador. Para esta investigación se escogió un nivel de confianza de 80% (Bustamante, 2011).

Tabla 7. Valores de Z con respecto al nivel de confianza.

Nivel de confianza	Z_{α}
99,7%	3
99%	2,58
98%	2,33
96%	2,05
95%	1,96
90%	1,695
80%	1,28
50%	0,674

Fuente: (Bustamante, 2011).

De esta manera el cálculo de la cantidad de muestras fue el siguiente:

$$n = \frac{1,28^2 * 0,5 * 0,5}{0,05^2}$$

$$n = 163,84 \approx 164 \text{ muestras}$$

Para cumplir con los objetivos propuestos, fue necesario tomar mínimo 164 muestras en los puntos anteriormente mencionados, midiendo los parámetros descritos en la tabla 7.

En periodos de muestreo continuos de 24 horas se realizaron 3 muestreos en los cuales se recolectaron 220 muestras superando el valor mínimo, teniendo 60 muestras en la entrada del sedimentador, 60 muestras en la salida del sedimentador y 100 muestras de las purgas del sedimentador.

1.11.2 Fase 2. Evaluación de la ecuación con los datos de la planta

Durante esta fase se evaluó la ecuación obtenida a partir de la correlación realizada en términos de turbiedad, esto con la función de estimar la masa de lodos en el sistema (sedimentadores). Esta evaluación se realizó con los datos históricos de turbiedad y caudales tratados en la planta de potabilización de agua que son medidos cada hora, y así conocer la cantidad de sólidos suspendidos producidos y posteriormente determinar el caudal de salida de los lodos y compararlo con la capacidad de las bombas en la planta de tratamiento de lodos determinando el comportamiento de esta.

1.11.3 Fase 3. Estudio de sedimentabilidad del lodo

El estudio se verificó el comportamiento de la sedimentabilidad del lodo por gravedad en función del tiempo. De este mismo modo, se construyó una curva para determinar el tiempo medio de sedimentación con lodos obtenidos de las purgas del sedimentador N°4, estos se analizaron en cuatro (4) concentraciones diferentes, analizando una concentración sin dilución, y los tres restantes con concentraciones de 75%, 50% y 25% de lodo. Para la construcción de la curva, se tomaron lecturas de la altura de la lámina de lodos en los tiempos indicados en la tabla 9.

Tabla 8. Tiempos establecidos para prueba de sedimentabilidad.

Tiempo/ciclo	Duración de ciclo
20 segundos	2 minutos
1 minuto	5 minutos
3 minutos	12 minutos
5 minutos	15 minutos
10 minutos	50 minutos
15 minutos	30 minutos
20 minutos	1 hora

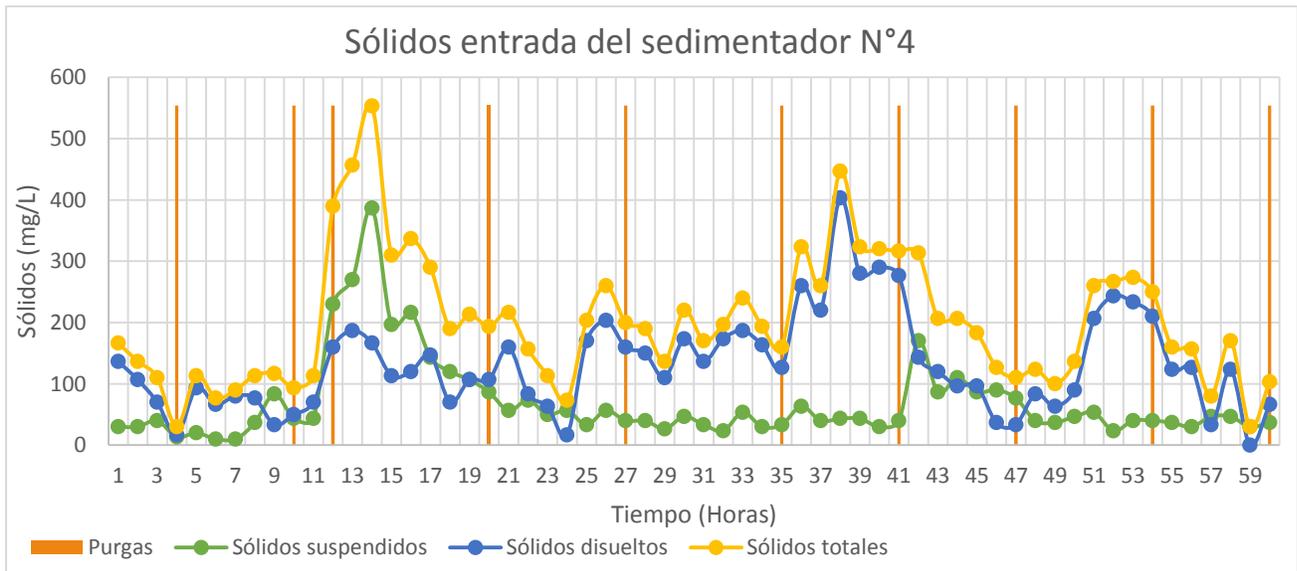
Fuente. Autores.

La duración de la prueba fue de aproximadamente tres horas con el fin de asegurar el mayor porcentaje de partículas sedimentadas. Se realizaron tres repeticiones por cada concentración para obtener mayor precisión. Los tiempos se tomaron hasta lograr la estabilidad de la curva y fueron establecidos por criterio de los autores.

Resultados y análisis

1.12 Fase 1. Toma de datos y generación de la ecuación

La gráfica 1 expone las concentraciones de sólidos totales, sólidos suspendidos y disueltos que fueron determinadas en el desarrollo del proyecto con muestras provenientes de la entrada del sedimentador N°4. En la gráfica, se puede evidenciar que la concentración de sólidos totales en el agua entrantes a la planta depende en mayor medida de la concentración de sólidos disueltos, que se deben en gran medida a las sales y minerales provenientes de las operaciones de minería que se realizan en el río Suratá antes que el agua cruda ingrese a la planta.



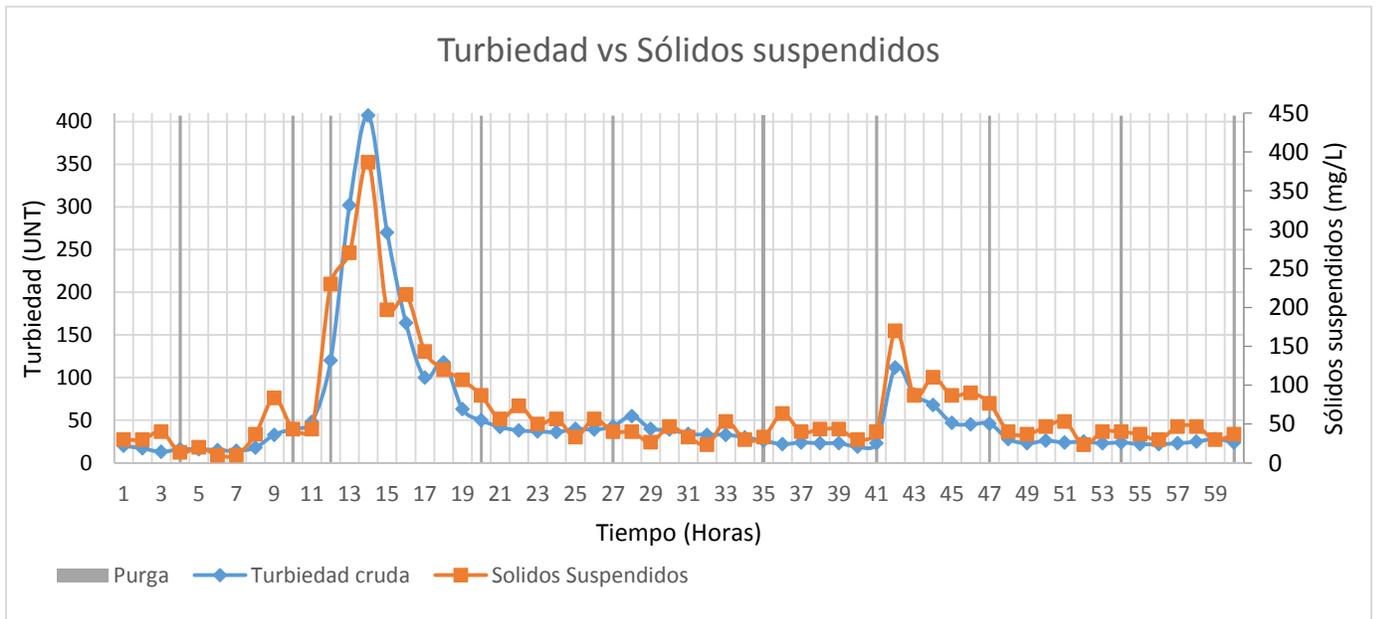
Gráfica 1. Sólidos en la entrada del sedimentador.

Fuente. Autores.

En cuanto a las concentraciones, el rango aproximado está entre 150 a 350 mg/l, sin incluir las concentraciones que no son retenidas por este sedimentador y pasan luego a los filtros. La concentración máxima analizada fue de 553,33 mg/l para sólidos totales y 387 mg/l para sólidos suspendidos, todo esto demuestra que el agua proveniente del río Suratá contiene bajos niveles

de sedimento, por tanto, su facilidad de predecir el funcionamiento de la planta de tratamiento de lodos junto con el análisis de sedimentabilidad al que fue sometido.

La gráfica 2 relaciona los valores de turbiedad con los sólidos suspendidos presentes en el agua cruda, se puede ver que en la mayor parte de las muestras cuando la turbiedad aumenta, también lo hace la concentración de sólidos suspendidos, teniendo así una relación directamente proporcional entre estas dos variables, este comportamiento influyó en la generación de la ecuación y fue analizado mediante un software estadístico.



Gráfica 2. Turbiedad del agua cruda y sólidos suspendidos en la entrada del sedimentador.
Fuente. Autores.

A partir de estos datos junto con el software estadístico IBM (International Business Machines) SPSS (Statistical Product and Service Solutions) Statistics, se realizó una correlación estadística bivariada por el método de Pearson, analizando así la totalidad de muestras recolectadas para sólidos suspendidos y turbiedad. Para la interpretación de esta correlación se debe tener en cuenta el valor del coeficiente de Pearson (Ver tabla 6).

En el análisis estadístico, se obtuvo un coeficiente de Pearson de 0,935 para la totalidad de datos relacionados como lo indica la tabla 12, teniendo en cuenta que la correlación es mejor en cuanto más cerca sea su valor a uno, se puede decir que la correlación que existe es excelente entre las variables de turbiedad y sólidos suspendidos.

Adicional a esto, teniendo en cuenta la tabla 7, se determinó la significancia de la correlación realizada, analizando un nivel base de 0.01 (α), representado en el grado de correlación de la tabla 12 como “***”, este valor junto con el valor p reportado como 0,000 determina la correlación como altamente significativa, puesto que se trabaja con un nivel más exigente (0.01) y no con el que suele establecerse (0.05) al determinar el nivel de significancia.

Tabla 9. Correlación estadística entre turbiedad y sólidos suspendidos.

		Turbiedad cruda	Sólidos Suspendidos
Turbiedad cruda	Correlación de Pearson	1	,935**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	60	60
Sólidos Suspendidos	Correlación de Pearson	,935**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	N	60	60

** La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

Fuente. Autores.

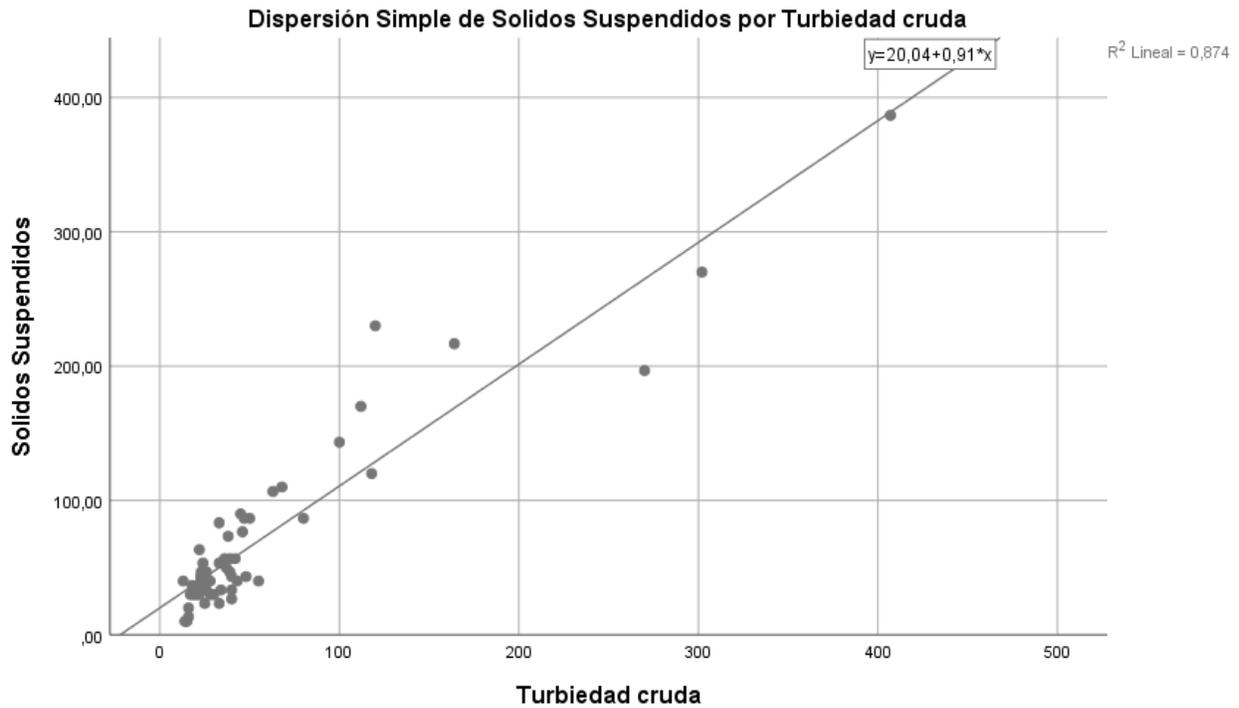
En la gráfica 3 se observa el diagrama de dispersión simple, en donde se analiza el comportamiento de los sólidos suspendidos en mg/L Vs. la Turbiedad del agua cruda en UNT como variable independiente. Se corrobora el comportamiento lineal, que a su vez genera la ecuación (1) la cual permitirá estimar cuantitativamente los sólidos suspendidos que se

producirán en el sedimentador en función de la turbiedad medida y que entrarán a la planta de tratamiento de lodo.

$$Y = 20,04 + 0,91X \quad (1)$$

Y = Sólidos suspendidos (mg/L)

X = Turbiedad (UNT)



Gráfica 3. Dispersión simple entre Sólidos suspendidos y Turbiedad del agua cruda
Fuente. Autores.

Se realizó una simulación de la ecuación (1) para los diferentes rangos de turbiedad del agua estudiada, junto con su respectiva concentración de sólidos suspendidos determinados previamente en el laboratorio y de esta manera evaluar el porcentaje de eficiencia de la ecuación analizando diferentes rangos de turbiedad y la eficiencia general de la ecuación. Se puede observar en la tabla 13 que el mayor porcentaje de eficiencia está en el rango de turbiedades entre 20 y 29 con 83,30 %, seguido de los rangos de turbiedad que van de 30 a 39 y los mayores

a 100 con eficiencias de 73,59 % y 73,05 % respectivamente. Por otra parte, el porcentaje de error más alto, es decir, la menor eficiencia de la ecuación es para turbiedades entre 0 y 19 UNT, con un porcentaje de 61,90 %. El error general de la ecuación es de 25,81%, por lo tanto, esta contara con una efectividad de 74,19 %.

Tabla 10. Porcentajes de eficiencia de la ecuación (1).

Rango de Turbiedad (UNT)	Porcentaje de Eficiencia
0 – 19	61,90 %
20 – 29	83,30 %
30 – 39	73,59 %
40 – 49	67,39 %
50 – 99	72,24 %
Mayores o iguales a 100	73,05 %
Eficiencia Promedio de la ecuación	74,19%

Fuente. Autores.

1.13 Fase 2. Evaluación de la ecuación con los datos de planta

Se evaluó la ecuación, tomando datos históricos de turbiedades y caudales tratados en la planta para un mes con turbiedades bajas (enero) y un mes con turbiedades altas (abril) en dos años diferentes (2018-2019). Estos datos fueron reemplazados en la variable independiente X de la ecuación (1) para obtener las concentraciones de sólidos suspendidos y predecir así los caudales de lodos que entrarían a la planta de tratamiento de lodos para su funcionamiento.

Según el Acueducto metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. (2015), para la evaluación del funcionamiento del sistema de extracción de lodo de los sedimentadores No. 3 y 4 de la planta de

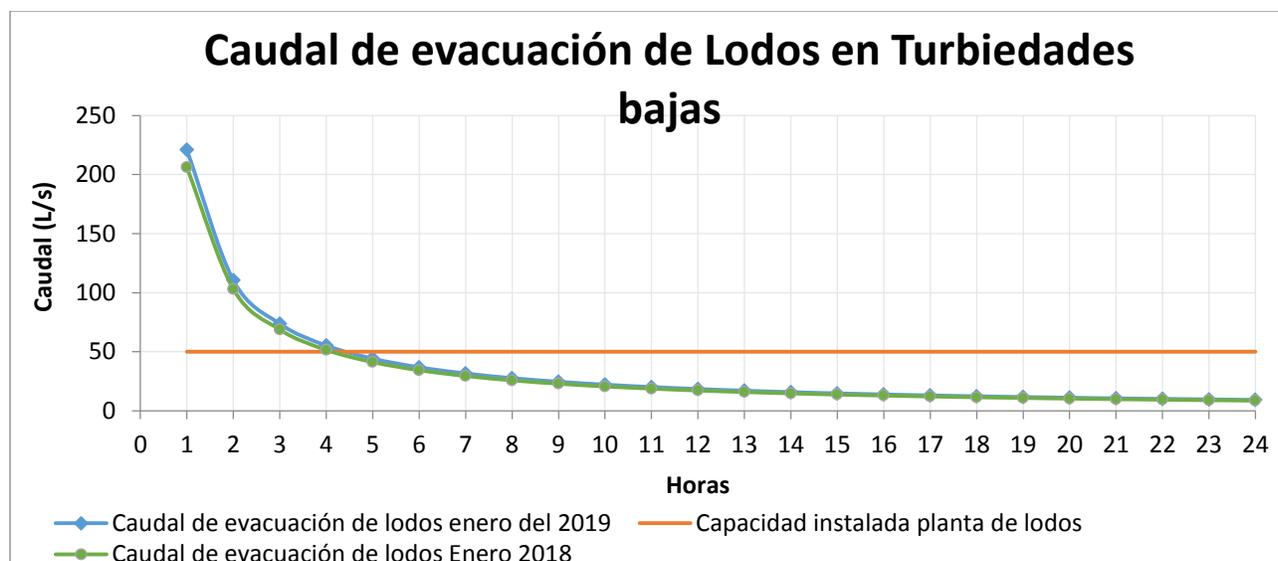
Bosconia, el caudal promedio de lodo evacuado para este último es de 15.67 L/s, por lo tanto, se analizaron diferentes tiempos de funcionamiento de la bomba, con el fin de encontrar cuál de ellos cumplía con el valor de este caudal y así conocer la operabilidad de esta planta.

La tabla 14 muestra la simulación en diferentes horas de caudales entrantes a la planta de tratamiento de lodos comparando un mismo mes con turbiedades bajas en dos años diferentes, dando como resultado tiempos de operación entre 14 y 15 horas para trabajar los caudales mínimos de operación, es decir, la planta de tratamiento de lodos debe trabajar ese tiempo para tratar el lodo producido en los cuatro sedimentadores.

Tabla 11. Promedio de caudales de lodos en turbiedades bajas-2018.

Promedio caudales en Enero							
2018				2019			
Tiempo	Caudal (L/s)	Tiempo	Caudal (L/s)	Tiempo	Caudal(L/s)	Tiempo	Caudal(L/s)
1 Hora	206,07	13 Horas	15,85	1 Hora	220,85	13 Horas	16,99
2 Horas	103,04	14 Horas	14,72	2 Horas	110,43	14 Horas	15,78
3 Horas	68,69	15 Horas	13,74	3 Horas	73,62	15 Horas	14,72
4 Horas	51,52	16 Horas	12,88	4 Horas	55,21	16 Horas	13,8
5 Horas	41,21	17 Horas	12,12	5 Horas	44,17	17 Horas	12,99
6 Horas	34,35	18 Horas	11,45	6 Horas	36,81	18 Horas	12,27
7 Horas	29,44	19 Horas	10,85	7 Horas	31,55	19 Horas	11,62
8 Horas	25,76	20 Horas	10,30	8 Horas	27,61	20 Horas	11,04
9 Horas	22,90	21 Horas	9,81	9 Horas	24,54	21 Horas	10,52
10 Horas	20,61	22 Horas	9,37	10 Horas	22,09	22 Horas	10,04
11 Horas	18,73	23 Horas	8,96	11 Horas	20,08	23 Horas	9,6
12 Horas	17,17	24 Horas	8,59	12 Horas	18,4	24 Horas	9,2

Fuente. Autores.



Gráfica 4. Caudales de evacuación de lodos en Turbiedades bajas 2018 y 2019.

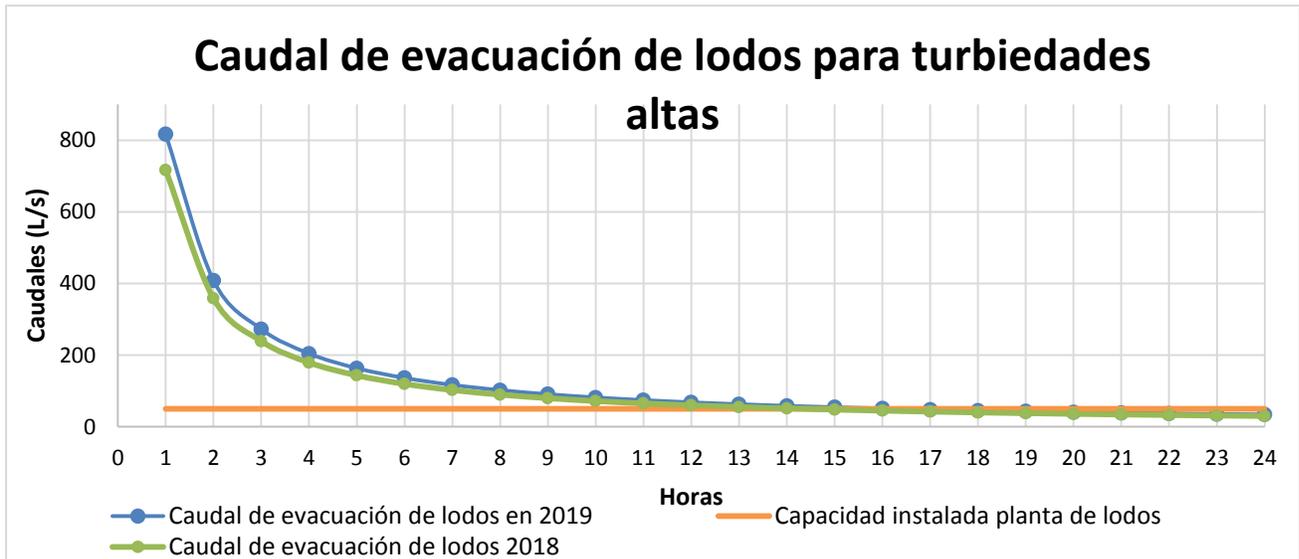
Fuente. Autores.

El mes de abril (turbiedades altas), la simulación dio como resultado un tiempo de 24 horas de operación de la bomba para los dos años, pero debido a que el caudal supera el caudal límite, se debe dividir entre 4 bombas y así cada una cumplirá con el caudal de 15.67 L/s.

Tabla 12. Promedio de caudales de lodo en turbiedades altas-2018

Promedio caudales en Abril							
2018				2019			
Tiempo	Caudal (L/s)	Tiempo	Caudal (L/s)	Tiempo	Caudal(L/s)	Tiempo	Caudal(L/s)
1 Hora	716,72	13 Horas	55,13	1 Hora	817,13	13 Horas	62,86
2 Horas	358,36	14 Horas	51,19	2 Horas	408,56	14 Horas	58,37
3 Horas	238,91	15 Horas	47,78	3 Horas	272,38	15 Horas	54,48
4 Horas	179,18	16 Horas	44,80	4 Horas	204,28	16 Horas	51,07
5 Horas	143,34	17 Horas	42,16	5 Horas	163,43	17 Horas	48,07
6 Horas	119,45	18 Horas	39,82	6 Horas	136,19	18 Horas	45,4
7 Horas	102,39	19 Horas	37,72	7 Horas	116,73	19 Horas	43,01
8 Horas	89,59	20 Horas	35,84	8 Horas	102,14	20 Horas	40,86
9 Horas	79,64	21 Horas	34,13	9 Horas	90,79	21 Horas	38,91
10 Horas	71,67	22 Horas	32,58	10 Horas	81,71	22 Horas	37,14
11 Horas	65,16	23 Horas	31,16	11 Horas	74,28	23 Horas	35,53
12 Horas	59,73	24 Horas	29,86	12 Horas	68,09	24 Horas	34,05

Fuente. Autores.



Grafica 5. Caudales de evacuación de lodos Turbiedades altas 2018 y 2019.

Fuente. Autores.

La capacidad instalada de la planta de tratamiento de lodos está proyectada para 50 L/s, teniendo en cuenta esto y que se busca tratar lodos de otra planta, y que dado a que al provenir de otro afluente el lodo presentará características diferentes, se busca distribuir el tiempo de operación de tal manera que las dos plantas puedan tratar el lodo producido en un día de operación, es decir, aumentar el número de bombas para reducir el tiempo de operación y permitir así que ambas puedan tratar el lodo generado.

En cuanto a los comportamientos de los caudales simulados, en las gráficas 4 y 5 se puede evidenciar que presentan una relación inversamente proporcional en donde los caudales disminuyen a medida que el tiempo aumenta, esta metodología facilitó la elección del tiempo en que la bomba tardaría en llegar al caudal límite. Se puede destacar, el comportamiento similar de los caudales para los dos años, conociendo esto, que además ocurre de la misma manera para la mayoría de los meses restantes es posible definir el tiempo de operación para todo un año de la bomba que evacuará los lodos que provienen de los sedimentadores.

1.14 Fase 3. Estudio de Sedimentabilidad del lodo

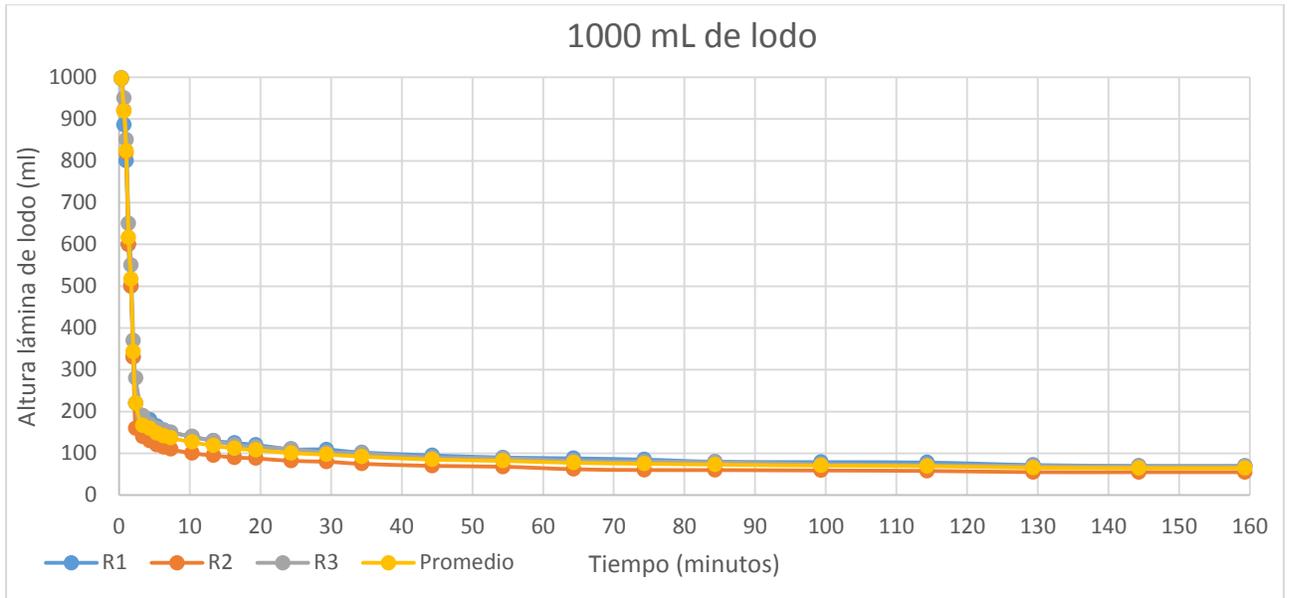
Este estudio permitió conocer el tiempo que tarda el lodo en sedimentar en diferentes concentraciones. Como es de esperarse la altura final de la lámina de lodo es menor, a medida que la cantidad de agua con la que se diluyó fue mayor, pero sin importar la concentración que se trabajó (con o sin dilución), para todas las curvas, los lodos tienen tiempos de precipitación bajos, menores de 10 minutos, es decir, se relacionan con una buena sedimentabilidad, ya que se tendría un tiempo muy bajo para el tratamiento de los lodos entrantes por las purgas de los sedimentadores.

Tabla 13. Concentraciones sólidos sin dilución para pruebas de sedimentabilidad.

<i>Inicial - 1000 ml</i>				
Número de Muestra	Volumen (mL)	Sólidos Suspendedos (mg/L)	Sólidos disueltos (mg/L)	Sólidos Totales (mg/L)
<i>CIR1</i>	10	3670	700	4370
<i>CIR2</i>	10	3330	800	4130
<i>CIR3</i>	10	3610	750	4360

<i>Final - 1000 ml</i>				
Número de Muestra	Volumen (mL)	Sólidos Suspendedos (mg/L)	Sólidos disueltos (mg/L)	Sólidos Totales (mg/L)
<i>CIR1</i>	10	75420,00	630,00	76050,00
<i>CIR2</i>	10	63990,00	1790,00	65780
<i>CIR3</i>	10	69120,00	1250,00	70370,00

Fuente. Autores.



Grafica 6. Curva de sedimentación de lodos para el lodo sin diluir.

Fuente. Autores

Conclusiones

- La correlación de las variables turbiedad de entrada y sólidos suspendidos presentó un nivel de significancia alto (nivel 0,01), permitiendo predecir la concentración de sólidos suspendidos que se producirán en el sedimentador con un porcentaje de eficiencia general de 74,19%.
- Las mejores eficiencias de la ecuación se presentan para de turbiedades entre 20 a 29 UNT con 83,30%; 30 a 39 UNT con 73,59%; y turbiedades mayores o iguales a 100 UNT con 73,05% de eficiencia.
- La ecuación generada con caudales de operación históricos permitió predecir la producción de lodos y así el tiempo de funcionamiento de la planta para épocas de turbiedades bajas de 14 a 15 horas y para turbiedades altas de 23 a 24 horas.
- Para los lodos producidos en la PTAP de Bosconia el tiempo de sedimentación es muy corto, llegando a la estabilidad del lodo en menos de 10 minutos, sin importar la dilución en la que se encuentren. Esto, ayudará a reducir la duración del tratamiento y por consiguiente aumentar los caudales mínimos de operación.

Bibliografía

- Acueducto Metropolitano de Bucaramanga- AMB. (2010). Primer informe de avance estudios y diseños del sistema de extracción y conducción de lodos de la planta de tratamiento de agua potable Bosconia hasta la planta de lodos. Bucaramanga.
- Agudelo Patiño, J. F., & Alvear Daza, A. E. (2015). *ESTUDIO DE LA SEDIMENTABILIDAD DE LOS SÓLIDOS PRESENTES EN EL TRATAMIENTO PRIMARIO DEL AGUA RESIDUAL DÓMESTICA DE LA CIUDAD DE CALI*. Santiago de Cali.
- ALDANA TIQUE, A. J., & PÉREZ ROJAS, R. A. (2017). *PROPUESTA PARA EL TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE LODOS EN UNA PTAP CONVENCIONAL. CASO DE ESTUDIO: PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE EL ESPINAL - TOLIMA*. BOGOTÁ.
- AMB. (2017). Obtenido de <http://www.amb.com.co/frmInformacion.aspx?inf=36>
- Arboleda Valencia, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua* (Tercera Edición ed.). Bogotá D.C: McGraw-Hill.
- Bencardino, C. M. (2012). *Estadística y muestreo*. Bogotá: ECOE.
- Bustamante, G. (2011). APROXIMACION AL MUESTREO ESTADISTICO EN INVESTIGACIONES CIENTIFICAS. *Revista de Actualización Clínica*, 478.
- Culp, G., Hsiung, K., & Conley, W. (1969). *Tube clarification process- Operating experiences*, ASCE.
- Dodane, P.-H., & Bassan, M. (s.f.). *Tanques de Sedimentación*. Obtenido de https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/EWM/FSM_Libro_low_res/manejo_fsm_cap6_120ppi.pdf
- Escobar R., J. C. (2004). Gestión integral del manejo de lodos de plantas de tratamiento de Agua Potable. ACODAL.
- Giraldo G, G. I. (1995). *MANUAL DE ANÁLISIS DE AGUAS*. Manizales.
- Gutiérrez Rosero, J. A., Ramírez Fajardo, Á. I., Rivas, R., Linares, B., & Paredes, D. (2014). Tratamiento de lodos generados en el proceso convencional de potabilización de agua. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*.
- Hanzen, A. (1904). *On sedimentation*. Trans Am Soc Civil Eng 53:63.
- IDEAM. (2007). *Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales*.
- Laguna, C. (2017). *CORRELACIÓN Y REGRESIÓN LINEAL. Diplomado en salud pública*. España.
- Lozano-Rivas, W. A., & Lozano Bravo, G. (2015). *Potabilización del agua: principios de diseño y control de procesos y laboratorio*. Universidad Piloto de Colombia.
- Maldonado Y, V. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I Teoría Tomo II*. Lima, Peru: CEPIS.

MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (2007). RESOLUCIÓN 2115. Colombia.

OLIVA, U., & GIACOMA, G. P. (2008). *Estudio de la dinámica de sedimentación de lodos mediante un sistema optico.*

Perez, J. (1997). *Avances en sedimentación. Curso sobre Tecnología de Tratamiento de Agua para Países en Desarrollo.* CEPIS.

Ramirez Fernández, G. A. (2003). *Manejo de lodos producidos en la planta de tratamiento de agua potable, planta II, del municipio de Cartago, Valle.* Manizales.

Ramírez Quirós, F. (2008). *Lodos producidos en el tratamiento del agua potable.*

Rice, E., Baird, R., & Eaton, A. (2012). *Standard Methods.* Clearway Logistics.

Romero Rojas, J. A. (2000). *Purificación del agua.* Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

SASTOQUE PERILLA, J. E. (2015). *Estrategias para el reusó de los lodos en la zona dos de la Empresa de Acueducto y alcantarillado de Bogotá y plantas de tratamiento de aguas potables y residuales.* Bogotá.

Sierra Ramírez, C. (2011). *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico.* Medellín: Ediciones de la U.

Torres, A. (2013). *Metodología para estimar concentraciones de SST en tiempo real en hidrosistemas urbanos a partir de mediciones de turbiedad.* Bogotá.

Torres, J. N. (2013). *Propuesta metodológica para tratamiento de lodos provenientes de plantas de potabilización en la sabana de Bogotá (Estudio de caso Madrid, Cundinamarca).* Bogotá D.C.

Van Haandel, A. C., & Marais, G. (1999). *O comportamento do sistema do lodo ativado. Teoria e aplicacoes para projetos e opracao.* Campina Grande, Brazil.

Vera B., N. (2007). *Alternativas de potabilización para el agua que abastecerá a la ampliación del aeropuerto internacional de la ciudad de Mexico.* Mexico D.F.

Von Sperling, M. (2001). Dimensionamento de lodos ativados por batelada utilizando os princípios da teoria do fluxo de solidos. . *Engenharia sanitária e ambiental.*

Yao, K. (1970). *Theoretic study of high rate sedimentation.*

Anexos

Anexo 1. Parámetros físico - químicos medidos in situ en la entrada del sedimentador.

Número de muestra	Hora	Caudal (L/s)	Turbiedad cruda (UNT)	pH	Conductividad (µs/cm)	OD (mg/L)
ES-1	11:22	702,57	20	7,38	236	8,15
ES-2	12:30	710,04	17	7,49	244	8,3
ES-3	01:50	752,78	13	7,45	246	8,11
ES-4	03:05	788,2	16	7,41	246	8,1
ES-5	5	685,2	16	7,43	248	8,11
ES-6	06:35	679,55	15	7,6	240	8,1
ES-7	07:30	659,55	14	7,44	234	8,09
ES-8	08:32	669,47	18	7,48	231	8,17
ES-9	09:32	683,98	33	7,41	230	8,18
ES-10	10:34	1075,71	40	7,49	233	8,15
ES-11	12:50	684,9	48	7,46	224	8,2
	-	-	-	-	-	-
ES-12	07:14	815,12	120	7,28	230	8,21
ES-13	08:54	776,09	302	7,22	224	8,23
ES-14	09:45	749,59	407	7,19	247	8,25
ES-15	10:45	732,36	270	6,98	247	8,18
ES-16	11:40	733,31	164	7,11	243	8,29
ES-17	12;35	712,53	100	7,12	236	8,15
ES-18	01:30	700,72	118	7,15	233	8,1
ES-19	02:32	659,76	63	7,15	237	7,9
ES-20	03:20	634,96	50	7,34	234	7,79
ES-21	04:50	600,86	42	7,27	238	7,93
ES-22	05:50	240,88	38	7,26	220	7,79
ES-23	06:50	888,64	37	7,32	220	7,9
ES-24	07:50	777,71	36	7,47	226	7,93
ES-25	08:50	646,46	40	7,44	224	7,95
ES-26	09:50	644,4	39	7,35	231	7,96
ES-27	10:50	648,24	43	7,45	231	8,02
ES-28	12:40	749,42	55	7,5	230	8,06
ES-29	01:50	700,25	40	7,4	231	8,1
ES-30	02:50	688,82	39	7,62	230	8,18
ES-31	03:47	670,21	34	7,48	233	8,16
ES-32	04:50	637,69	33	7,44	233	8,22
ES-33	05:50	659,72	33	7,54	232	8,38

ES-34	06:48	781,88	30	7,43	231	8,28
ES-35	07:48	796,1	26	7,6	232	8,28
ES-36	09:53	774,93	22	7,34	244	8,07
ES-37	11:04	775,77	24	7,33	245	7,96
ES-38	12:00	952,74	23	7,4	248	7,78
ES-39	13:00	942,74	23	7,41	249	7,84
ES-40	14:00	926,34	19	7,49	245	8,04
ES-41	15:00	805,08	23	7,62	253	8,44
ES-42	09:40	862,4	112	7,49	244	8,07
ES-43	10:40	843,53	80	7,55	184	8,18
ES-44	11:40	655,24	68	7,57	184	8,04
ES-45	12:40	622,58	47	7,73	183	8,12
ES-46	13:40	1385,85	45	7,68	181	8,1
ES-47	14:40	1473,51	46	7,72	181	8,06
ES-48	17:10	1397,77	28	7,7	182	8,14
ES-49	18:10	689,56	23	7,89	183	8,08
ES-50	19:10	927,24	26	7,88	184	7,95
ES-51	20:10	860,14	24	7,82	184	8,04
ES-52	21:10	666,24	25	7,89	185	7,9
ES-53	22:10	651,9	23	7,86	185	7,95
ES-54	23:10	6141,06	24	7,76	195	7,98
ES-55	02:10	766,26	22	7,71	190	7,98
ES-56	03:10	761,66	22	7,73	192	7,95
ES-57	04:10	751,31	23	7,73	190	8,02
ES-58	05:10	742,15	25	7,84	189	8,1

Fuente. Autores.

Anexo 2. Parámetros físico - químicos medidos in situ en la entrada del sedimentador.

Número de muestra	Hora	Caudal (L/s)	Turbiedad cruda (UNT)	pH	Conductividad (μs/cm)	OD (mg/L)
SS 1	11:22	702,57	20	7,44	233	8,23
SS 2	12:30	710,04	17	7,37	236	8,14
SS 3	01:50	752,78	13	7,43	248	8,26
SS 4	03:05	788,2	16	7,42	226	8,35
SS 5	5	685,2	16	7,4	237	8,22
SS 6	06:35	679,55	15	7,44	236	8,17
SS 7	07:30	659,55	14	7,43	233	8,08
SS 8	08:32	669,47	18	7,49	231	8,12
SS 9	09:32	683,98	33	2,54	229	8,14
SS 10	10:34	1075,71	40	7,53	230	8,1

SS 11	12:50	684,9	48	7,45	232	8,22
	-	-	-	-	-	-
SS 12	07:14	815,12	120	7,33	225	8,02
SS 13	08:54	776,09	302	7,16	2,22	8,2
SS 14	09:45	749,59	407	7,08	235	8,35
SS 15	10:45	732,36	270	6,97	248	8,43
SS 16	11:40	733,31	164	6,93	243	8,49
SS 17	12:35	712,53	100	6,9	246	8,69
SS 18	01:30	700,72	118	7,2	238	8,47
SS 19	02:32	659,76	63	7,24	234	8,26
SS 20	03:20	634,96	50	7,18	235	8,11
SS 21	04:50	600,86	42	7,32	236	8,1
SS 22	05:50	240,88	38	7,24	231	8,01
SS 23	06:50	888,64	37	7,31	232	7,97
SS 24	07:50	777,71	36	7,36	223	7,89
SS 25	08:50	646,46	40	7,38	222	791
SS 26	09:50	644,4	39	7,39	234	7,86
SS 27	10:50	648,24	43	7,41	227	7,94
SS 28	12:40	749,42	55	7,35	230	7,98
SS 29	01:50	700,25	40	7,46	232	8,1
SS 30	02:50	688,82	39	7,49	231	8,06
SS 31	03:47	670,21	34	7,38	232	8,04
SS 32	04:50	637,69	33	7,42	238	8,21
SS 33	05:50	659,72	33	7,43	232	8,22
SS 34	06:48	781,88	30	7,53	233	8,2
SS 35	07:48	796,1	26	7,43	233	8,25
SS 36	09:53	774,93	22	7,2	270	7,92
SS 37	11:04	775,77	24	7,34	244	8,13
SS 38	12:00	952,74	23	7,43	246	8,33
SS 39	13:00	942,74	23	7,43	242	8,45
SS 40	14:00	926,34	19	7,38	253	8,53
SS 41	15:00	805,08	23	7,63	245	8,89
SS 42	09:40	862,4	112	7,53	185	8,04
SS 43	10:40	843,53	80	7,47	184	8,26
SS 44	11:40	655,24	68	7,43	183	8,43
SS 45	12:40	622,58	47	7,57	183	8,3
SS 46	13:40	1385,85	45	7,7	182	8,14
SS 47	14:40	1473,51	46	7,66	195	8,12
SS 48	17:10	1397,77	28	7,8	183	8,11
SS 49	18:10	689,56	23	7,92	181	8,04

SS 50	19:10	927,24	26	7,9	183	8,03
SS 51	20:10	860,14	24	7,83	184	7,96
SS 52	21:10	666,24	25	7,9	184	7,89
SS 53	22:10	651,9	23	7,85	185	7,88
SS 54	23:10	641,06	24	7,74	186	7,9
SS 55	02:10	766,26	22	7,77	189	7,72
SS 56	03:10	761,66	22	7,87	190	7,7
SS 57	04:10	751,31	23	7,81	189	7,82
SS 58	05:10	742,15	25	7,8	194	7,9
SS 59	06:10	678,34	28	7,74	189	7,92
SS 60	07:10	639,12	24	7,8	189	8,12

Fuente. Autores.

Anexo 3. Parámetros físico-químicos in situ de las purgas de sedimentadores - muestreo 1

PLAN DE MUESTREO				
FECHA DEL MUESTREO:		2 de Septiembre		
HORARIO DEL MUESTREO:		HORA INICIO: 3:00 pm	HORA FINALIZACIÓN: 3:50 pm	
Número de muestra	Hora	pH	Conductividad (μs/cm)	OD (mg/L)
PL 1-1	3:00:00 p. m.	7,41	226	8,07
PL 2-1	3:05:00 p. m.	7,4	230	8,1
PL 3-1	3:10:00 p. m.	7,39	225	8,07
PL 4-1	3:15:00 p. m.	7,42	229	8,09
PL 5-1	3:20:00 p. m.	7,45	230	8,07
PL 6-1	3:25:00 p. m.	7,42	227	8,06
PL 7-1	3:30:00 p. m.	7,42	228	8,1
PL 8-1	3:35:00 p. m.	7,41	226	8,11
PL 9-1	3:40:00 p. m.	7,4	230	8,08
PL 10-1	3:45:00 p. m.	7,39	228	8,08
PL 1-2	11:00:00 p. m.	7,16	231	8,17
PL 2-2	11:05:00 p. m.	7,2	234	8,15
PL 3-2	11:10:00 p. m.	7,22	237	8,18
PL 4-2	11:15:00 p. m.	7,2	235	8,17
PL 5-2	11:20:00 p. m.	7,18	235	8,19
PL 6-2	11:25:00 p. m.	7,21	237	8,14
PL 7-2	11:30:00 p. m.	7,2	231	8,17
PL 8-2	11:35:00 p. m.	7,19	234	8,18
PL 9-2	11:40:00 p. m.	7,19	235	8,19
PL 10-2	11:45:00 p. m.	7,2	232	8,16
PL 1-3	7:30:00 a. m.	7,58	224	8,09
PL 2-3	7:35:00 a. m.	7,52	227	8,1

PL 3-3	7:40:00 a. m.	7,41	225	8,07
PL 4-3	7:45:00 a. m.	7,53	226	8,09
PL 5-3	7:50:00 a. m.	7,46	231	8,07
PL 6-3	7:55:00 a. m.	7,48	238	8,1
PL 7-3	8:00:00 a. m.	7,51	234	8,1
PL 8-3	8:05:00 a. m.	7,54	237	8,09
PL 9-3	8:10:00 a. m.	7,6	239	8,06
PL 10-3	8:15:00 a. m.	7,58	224	8,07
PL 1-4	3:35:00 p. m.	7,26	239	7,44
PL 2-4	3:40:00 p. m.	7,3	238	7,46
PL 3-4	3:45:00 p. m.	7,29	240	7,38
PL 4-4	3:50:00 p. m.	7,29	238	7,5
PL 5-4	3:55:00 p. m.	7,26	241	7,52
PL 6-4	4:00:00 p. m.	7,25	236	7,5
PL 7-4	4:05:00 p. m.	7,27	236	7,46
PL 8-4	4:10:00 p. m.	7,29	233	7,42
PL 9-4	4:15:00 p. m.	7,26	237	7,49
PL 10-4	4:20:00 p. m.	7,26	237	7,47
PL 1-5	11:20:00 p. m.	7,54	233	7,95
PL 2-5	11:25:00 p. m.	7,51	236	7,95
PL 3-5	11:30:00 p. m.	7,53	247	7,93
PL 4-5	11:35:00 p. m.	7,53	260	8,02
PL 5-5	11:40:00 p. m.	7,6	244	7,95
PL 6-5	11:45:00 p. m.	7,54	233	8,01
PL 7-5	11:50:00 p. m.	7,41	242	8,01
PL 8-5	11:55:00 p. m.	7,49	225	7,96
PL 9-5	12:00:00 a. m.	7,49	236	7,97
PL 10-5	12:05:00 a. m.	7,52	246	7,97
PL 1-6	9:18:00 a. m.	7,57	241	7,85
PL 2-6	9:23:00 a. m.	7,54	235	7,97
PL 3-6	9:28:00 a. m.	7,53	236	7,97
PL 4-6	9:33:00 a. m.	7,51	242	7,92
PL 5-6	9:38:00 a. m.	7,59	237	8,07
PL 6-6	9:43:00 a. m.	7,61	341	8,1
PL 7-6	9:48:00 a. m.	7,48	273	6,96
PL 8-6	9:53:00 a. m.	7,53	237	8,05
PL 9-6	9:58:00 a. m.	7,59	235	8,04
PL 10-6	10:03:00 a. m.	7,59	238	8,18

Anexo 4. Parámetros físico-químicos in situ de las purgas de sedimentadores - muestreo 2

PLAN DE MUESTREO				
FECHA DEL MUESTREO:		17 de Septiembre		
HORARIO DEL MUESTREO:		HORA DE INICIO: 3:00 pm		
Número de muestra	Hora	pH	Conductividad (µs/cm)	OD (mg/L)
PL 1-1	3:00:00 p. m.	7,68	249	7,86
PL 2-1	3:05:00 p. m.	7,63	261	7,51
PL 3-1	3:10:00 p. m.	7,54	279	6,96
PL 4-1	3:15:00 p. m.	7,52	272	6,75
PL 5-1	3:20:00 p. m.	7,45	269	7,1
PL 6-1	3:25:00 p. m.	7,47	249	7,91
PL 7-1	3:30:00 p. m.	7,42	275	6,68
PL 8-1	3:35:00 p. m.	7,49	252	7,74
PL 9-1	3:40:00 p. m.	7,55	248	7,92
PL 10-1	3:45:00 p. m.	7,57	253	7,86

Fuente. Autores

Anexo 5. Parámetros físico-químicos in situ de las purgas de sedimentadores - muestreo 3

PLAN DE MUESTREO				
FECHA DEL MUESTREO:		2 de Octubre		
HORARIO DEL MUESTREO:		HORA DE INICIO: 3:00 pm		
Número de muestra	Hora	pH	Conductividad (µs/cm)	OD (mg/L)
PL 1-1	11:00:00 p. m.	7,73	203	7,63
PL 2-1	11:05:00 p. m.	7,74	192	7,82
PL 3-1	11:10:00 p. m.	7,78	190	7,92
PL 4-1	11:15:00 p. m.	7,76	226	7,15
PL 5-1	11:20:00 p. m.	7,68	228	6,53
PL 6-1	11:25:00 p. m.	7,68	237	6,79
PL 7-1	11:30:00 p. m.	7,73	190	7,73
PL 8-1	11:35:00 p. m.	7,72	235	6,54
PL 9-1	11:40:00 p. m.	7,7	237	6,07
PL 10-1	11:45:00 p. m.	7,69	237	6,47
PL 1-2	7:00:00 a. m.	7,74	238	7,9
PL 2-2	7:05:00 p. m.	7,78	240	7,88
PL 3-2	7:10:00 p. m.	7,69	237	7,81
PL 4-2	7:15:00 p. m.	7,78	192	7,46
PL 5-2	7:20:00 p. m.	7,68	224	7,86

PL 6-2	7:25:00 p. m.	7,67	219	6,38
PL 7-2	7:30:00 p. m.	7,73	230	7,75
PL 8-2	7:35:00 p. m.	7,72	240	6,79
PL 9-2	7:40:00 p. m.	7,63	231	6,41
PL 10-2	7:45:00 p. m.	7,75	238	6,51
PL 1-3	3:30:00 p. m.	7,92	190	8,18
PL 2-3	3:35:00 p. m.	7,92	188	8,19
PL 3-3	3:40:00 p. m.	7,95	189	8,25
PL 4-3	3:45:00 p. m.	7,96	189	8,22
PL 5-3	3:50:00 p. m.	7,98	189	8,24
PL 6-3	3:55:00 p. m.	7,99	190	8,22
PL 7-3	4:00:00 p. m.	7,99	188	8,22
PL 8-3	4:05:00 p. m.	7,98	190	8,24
PL 9-3	4:10:00 p. m.	7,94	189	8,25
PL 10-3	4:15:00 p. m.	7,96	189	8,25

Fuente. Autores

Anexo 6. Análisis de muestras de agua de la entrada del sedimentador.

Número de Muestra	Turbiedad cruda (UNT)	Volumen (ml)	Sólidos Suspendidos (mg/L)	Sólidos disueltos (mg/L)	Sólidos Totales (mg/L)
ES 1	20	30	30	136,6667	166,6667
ES 2	17	30	30	106,6667	136,6667
ES 3	13	30	40	70	110
ES 4	16	30	13,3333	16,6667	30
ES 5	16	30	20	93,3333	113,3333
ES 6	15	30	10	66,6667	76,6667
ES 7	14	30	10	80	90
ES 8	18	30	36,6667	76,6667	113,3333
ES 9	33	30	83,3333	33,3333	116,6667
ES 10	40	30	43,3333	50	93,3333
ES 11	48	30	43,3333	70	113,3333
ES 12	120	30	230,0000	160	390,0000
ES 13	302	30	270	186,6667	456,6667
ES 14	407	30	387	166,6667	553,3333
ES 15	270	30	196,6667	113,3333	310
ES 16	164	30	216,6667	120	336,6667
ES 17	100	30	143,3333	146,6667	290
ES 18	118	30	120,0000	70	190
ES 19	63	30	106,6667	106,6667	213,3333
ES 20	50	30	86,6667	106,6667	193,3333
ES 21	42	30	56,6667	160	216,6667
ES 22	38	30	73,3333	83,3333	156,6667
ES 23	37	30	50	63,3333	113,3333

ES 24	36	30	56,6667	16,6667	73,3333
ES 25	40	30	33,3333	170	203,3333
ES 26	39	30	56,6667	203,3333333	260
ES 27	43	30	40	160	200
ES 28	55	30	40	150	190
ES 29	40	30	26,6667	110	136,6667
ES 30	39	30	46,6667	173,3333	220
ES 31	34	30	33,3333	136,6667	170
ES 32	33	30	23,3333	173,3333	196,6667
ES 33	33	30	53,3333	186,6667	240
ES 34	30	30	30,0000	163,3333	193,3333
ES 35	26	30	33,3333	126,6667	160
ES 36	22	30	63	260,0000	323,3333
ES 37	24	30	40	220,0000	260,0000
ES 38	23	30	43	403,3333333	446,6666667
ES 39	23	30	43,3333	280,0000	323,3333333
ES 40	19	30	30	290,0000	320,0000
ES 41	23	30	40	276,6667	316,6667
ES 42	112	30	170	143,3333	313,3333
ES 43	80	30	87	120,0000	206,6667
ES 44	68	30	110	96,66666667	206,6666667
ES 45	47	30	86,6667	96,6667	183,3333333
ES 46	45	30	90	36,6667	126,6667
ES 47	46	30	77	33,3333	110,0000
ES 48	28	30	40	83,33333333	123,3333333
ES 49	23	30	36,6667	63,3333	100,0000
ES 50	26	30	46,6667	90,0000	136,6667
ES 51	24	30	53,3333	207	260,0000
ES 52	25	30	23,3333	243,3333333	266,6667
ES 53	23	30	40,0000	233,3333333	273,3333
ES 54	24	30	40	210,0000	250,0000
ES 55	22	30	37	123,3333	160,0000
ES 56	22	30	30,0000	126,6667	156,6666667
ES 57	23	30	46,6667	33,33333333	80,0000
ES 58	25	30	46,6667	123,3333	170
ES 59	28	30	30,0000	0	30
ES 60	24	30	36,6667	66,6667	103,3333

Fuente. Autores.

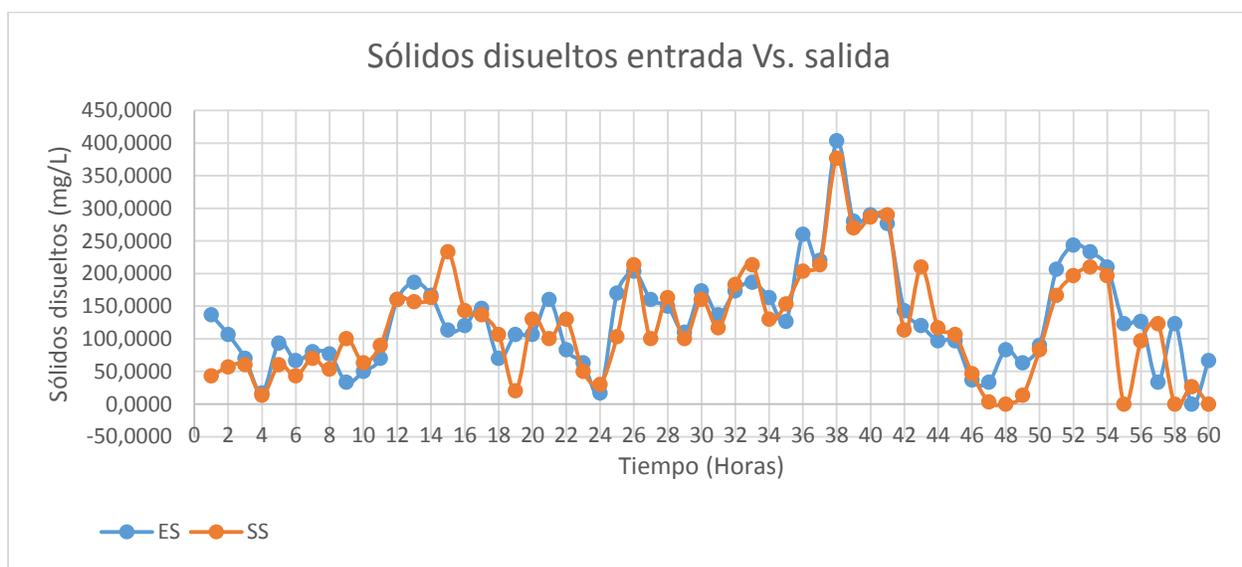
Anexo 7. Análisis de muestras de agua de la Salida del sedimentador.

Número de Muestra	Turbiedad cruda (UNT)	Volumen (ml)	Sólidos Suspendedos (mg/L)	Sólidos disueltos (mg/L)	Sólidos Totales (mg/L)
SS 1	20	30	10,0000	43,3333	53,3333
SS 2	17	30	16,6667	56,6667	73,3333333

SS 3	13	30	13,3333	60,0000	73,3333
SS 4	16	30	7	13,3333	20,0000
SS 5	16	30	13,3333	60,0000	73,3333
SS 6	15	30	6,6667	43,3333	50
SS 7	14	30	0	70,0000	70
SS 8	18	30	3,3333	53,3333	56,6667
SS 9	33	30	3,3333	100	103,3333
SS 10	40	30	3,3333	63,3333333	66,6667
SS 11	48	30	10	90,0000	100
SS 12	120	30	0	160	160
SS 13	302	30	0	156,6667	156,6667
SS 14	407	30	3	163,3333	166,6667
SS 15	270	30	10	233,3333	243,3333
SS 16	164	30	6,6667	143,3333	150
SS 17	100	30	3,3333	136,6667	140
SS 18	118	30	6,6667	106,6667	113,3333
SS 19	63	30	6,6667	20	26,6667
SS 20	50	30	3,3333	130	133,3333
SS 21	42	30	13,3333	100	113,3333
SS 22	38	30	20	130	150
SS 23	37	30	0	50	50
SS 24	36	30	6,6667	30	36,6667
SS 25	40	30	23,3333	103,3333	126,6667
SS 26	39	30	20	213,3333	233,3333
SS 27	43	30	26,6667	100	126,6667
SS 28	55	30	0	163,3333	163,3333
SS 29	40	30	6,6667	100,0000	106,6667
SS 30	39	30	10	160	170
SS 31	34	30	10	116,6667	126,6667
SS 32	33	30	0	183,3333	183,3333
SS 33	33	30	0	213,3333	213,3333
SS 34	30	30	6,6667	130	136,6667
SS 35	26	30	0	153,3333	153,3333
SS 36	20	30	13,3333	203,3333	216,6667
SS 37	17	30	6,6667	213,3333	220
SS 38	13	30	13,3333	376,6667	390,0000
SS 39	16	30	7	270,0000	276,6667
SS 40	16	30	20,0000	286,6667	306,6667
SS 41	15	30	10,0000	290,0000	300
SS 42	112	30	6,6667	113,3333	120,0000
SS 43	80	30	16,6667	210,0000	226,6667
SS 44	68	30	23,3333	116,666667	140
SS 45	47	30	3,3333	106,6667	110
SS 46	45	30	3,3333	46,6667	50,0000
SS 47	46	30	3,3333	3,3333	6,6667

SS 48	28	30	0,0000	0	0
SS 49	23	30	0,0000	13,3333	13,3333
SS 50	26	30	26,6667	83,3333	110,0000
SS 51	24	30	0,0000	167	166,6667
SS 52	25	30	0,0000	196,666667	196,6667
SS 53	23	30	0,0000	210	210,0000
SS 54	24	30	0,0000	196,6667	196,6667
SS 55	22	30	20,0000	0,0000	20,0000
SS 56	22	30	0,0000	96,6667	96,6666667
SS 57	23	30	0,0000	123,333333	123,3333
SS 58	25	30	0,0000	0,0000	0
SS 59	28	30	0,0000	26,6666667	26,6666667
SS 60	24	30	6,6667	0,0000	6,6667

Fuente. Autores.



Anexo 8. Gráfico de sólidos disueltos en la entrada y salida del sedimentador.

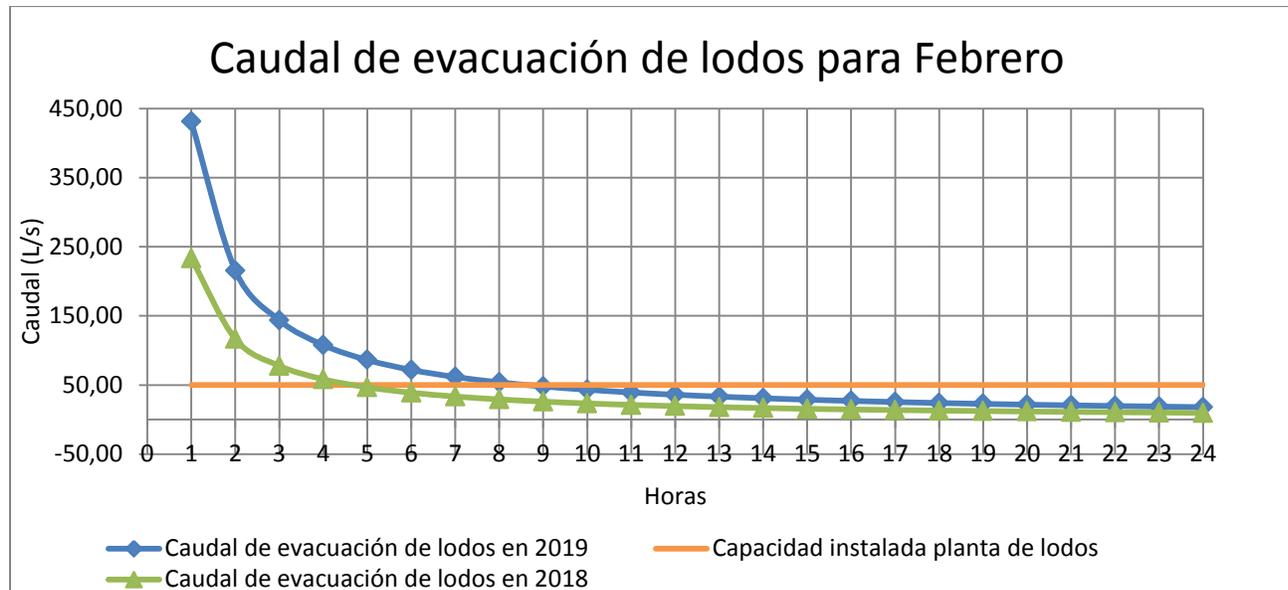
Fuente. Autores.

Anexo 9. Promedio de caudales de lodo en Febrero 2018-2019

Promedio caudales en Febrero							
2018				2019			
Tiempo	Caudal (L/s)	Tiempo	Caudal (L/s)	Tiempo	Caudal(L/s)	Tiempo	Caudal(L/s)
1 Hora	233,34	13 Horas	17,95	1 Hora	283,36	13 Horas	21,8
2 Horas	116,67	14 Horas	16,67	2 Horas	141,68	14 Horas	20,24
3 Horas	77,78	15 Horas	15,56	3 Horas	94,45	15 Horas	18,89
4 Horas	58,33	16 Horas	14,58	4 Horas	70,84	16 Horas	17,71
5 Horas	46,67	17 Horas	13,73	5 Horas	56,67	17 Horas	16,67
6 Horas	38,89	18 Horas	12,96	6 Horas	47,23	18 Horas	15,74

7 Horas	33,33	19 Horas	12,28	7 Horas	40,48	19 Horas	14,91
8 Horas	29,17	20 Horas	11,67	8 Horas	35,42	20 Horas	14,17
9 Horas	25,93	21 Horas	11,11	9 Horas	31,48	21 Horas	13,49
10 Horas	23,33	22 Horas	10,61	10 Horas	28,34	22 Horas	12,88
11 Horas	21,21	23 Horas	10,15	11 Horas	25,76	23 Horas	12,32
12 Horas	19,44	24 Horas	9,72	12 Horas	23,61	24 Horas	11,81

Fuente. Autores.



Anexo 10. Comportamiento de caudales promedio de evacuación de lodo en Febrero.

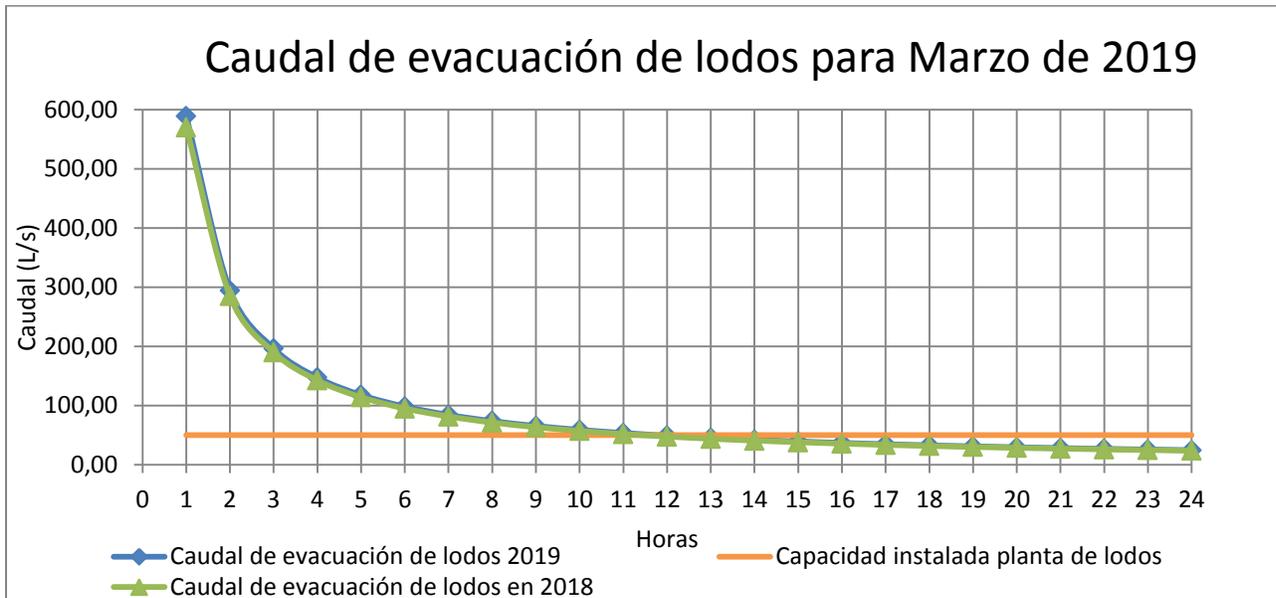
Fuente. Autores.

Anexo 11. Promedio de caudales de lodo en turbiedades altas-2018

Promedio de caudales de lodo en Marzo							
2018				2019			
Tiempo	Caudal (L/s)	Tiempo	Caudal (L/s)	Tiempo	Caudal(L/s)	Tiempo	Caudal(L/s)
1 Hora	570,16	13 Horas	43,86	1 Hora	588,88	13 Horas	45,3
2 Horas	285,08	14 Horas	40,73	2 Horas	294,44	14 Horas	42,06
3 Horas	190,05	15 Horas	38,01	3 Horas	196,29	15 Horas	39,26
4 Horas	142,54	16 Horas	35,63	4 Horas	147,22	16 Horas	36,8
5 Horas	114,03	17 Horas	33,54	5 Horas	117,78	17 Horas	34,64
6 Horas	95,03	18 Horas	31,68	6 Horas	98,15	18 Horas	32,72
7 Horas	81,45	19 Horas	30,01	7 Horas	84,13	19 Horas	30,99
8 Horas	71,27	20 Horas	28,51	8 Horas	73,61	20 Horas	29,44
9 Horas	63,35	21 Horas	27,15	9 Horas	65,43	21 Horas	28,04
10 Horas	57,02	22 Horas	25,92	10 Horas	58,89	22 Horas	26,77

11 Horas	51,83	23 Horas	24,79	11 Horas	53,53	23 Horas	25,6
12 Horas	47,51	24 Horas	23,76	12 Horas	49,07	24 Horas	24,54

Fuente. Autores



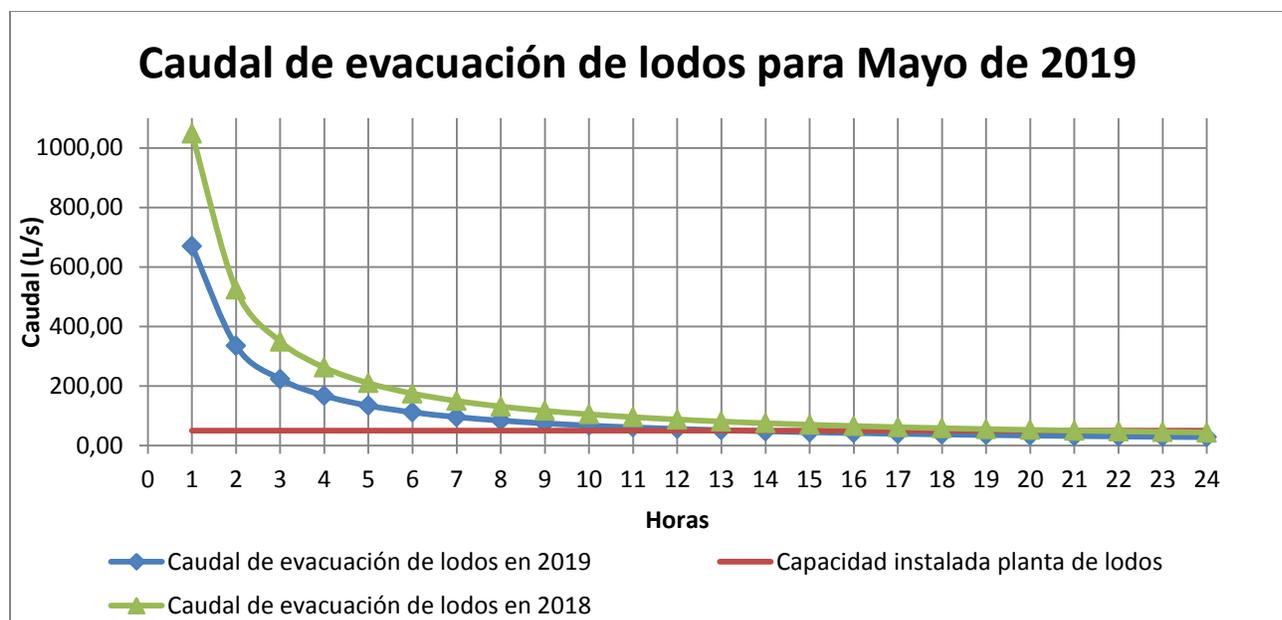
Anexo 12. Comportamiento de caudales promedio de evacuación de lodo en Marzo 2018-2019

Fuente. Autores

Anexo 13. Promedio de caudales de lodo en Mayo 2018-2019

Caudales promedio de Mayo							
2018				2019			
Tiempo	Caudal(L/s)	Tiempo	Caudal(L/s)	Tiempo	Caudal (L/s)	Tiempo	Caudal (L/s)
1 Hora	1048,49	13 Horas	80,65	1 Hora	670,10	13 Horas	51,55
2 Horas	524,24	14 Horas	74,89	2 Horas	335,05	14 Horas	47,86
3 Horas	349,5	15 Horas	69,9	3 Horas	223,37	15 Horas	44,67
4 Horas	262,12	16 Horas	65,53	4 Horas	167,53	16 Horas	41,88
5 Horas	209,7	17 Horas	61,68	5 Horas	134,02	17 Horas	39,42
6 Horas	174,75	18 Horas	58,25	6 Horas	111,68	18 Horas	37,23
7 Horas	149,78	19 Horas	55,18	7 Horas	95,73	19 Horas	35,27
8 Horas	131,06	20 Horas	52,42	8 Horas	83,76	20 Horas	33,51
9 Horas	116,5	21 Horas	49,93	9 Horas	74,46	21 Horas	31,91
10 Horas	104,85	22 Horas	47,66	10 Horas	67,01	22 Horas	30,46
11 Horas	95,32	23 Horas	45,59	11 Horas	60,92	23 Horas	29,13
12 Horas	87,37	24 Horas	43,69	12 Horas	55,92	24 Horas	27,92

Fuente. Autores



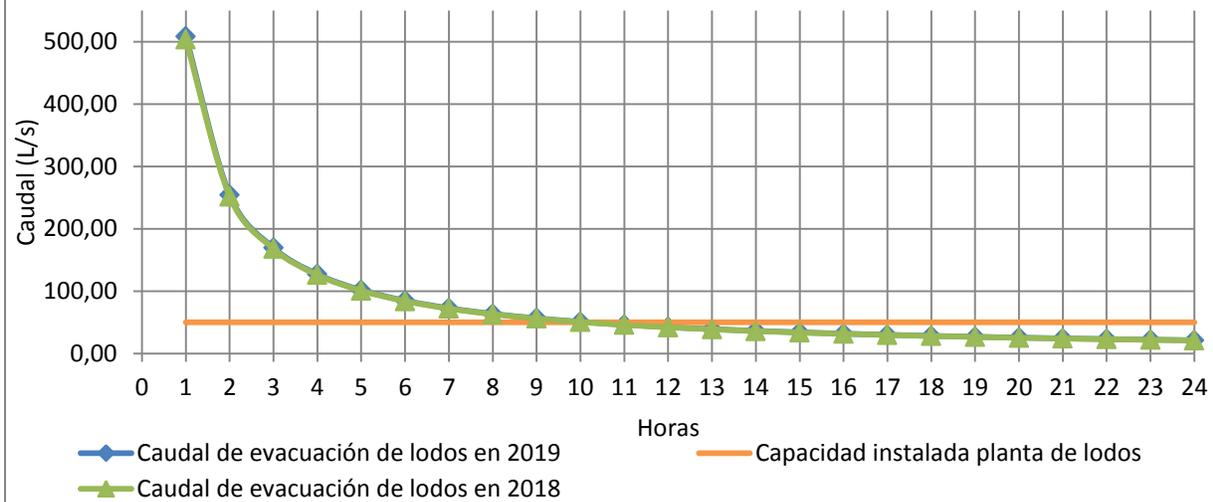
Anexo 14. Comportamiento de caudales promedio de evacuación de lodo en turbiedades altas-2018
Fuente. Autores

Anexo 15. Promedio de caudales de lodo en Junio 2018-2019

Promedio de caudales en Junio							
2018				2019			
Tiempo	Caudal (L/s)	Tiempo	Caudal (L/s)	Tiempo	Caudal(L/s)	Tiempo	Caudal(L/s)
1 Hora	503,68	13 Horas	38,74	1 Hora	508,29	13 Horas	39,1
2 Horas	251,84	14 Horas	35,98	2 Horas	254,15	14 Horas	36,31
3 Horas	167,89	15 Horas	33,58	3 Horas	169,43	15 Horas	33,89
4 Horas	125,92	16 Horas	31,48	4 Horas	127,07	16 Horas	31,77
5 Horas	100,74	17 Horas	29,63	5 Horas	101,66	17 Horas	29,9
6 Horas	83,95	18 Horas	27,98	6 Horas	84,72	18 Horas	28,24
7 Horas	71,95	19 Horas	26,51	7 Horas	72,61	19 Horas	26,75
8 Horas	62,96	20 Horas	25,18	8 Horas	63,54	20 Horas	25,41
9 Horas	55,96	21 Horas	23,98	9 Horas	56,48	21 Horas	24,2
10 Horas	50,37	22 Horas	22,89	10 Horas	50,83	22 Horas	23,1
11 Horas	45,79	23 Horas	21,9	11 Horas	46,21	23 Horas	22,1
12 Horas	41,97	24 Horas	20,99	12 Horas	42,36	24 Horas	21,18

Fuente. Autores

Caudal de evacuación de lodos para Junio de 2019

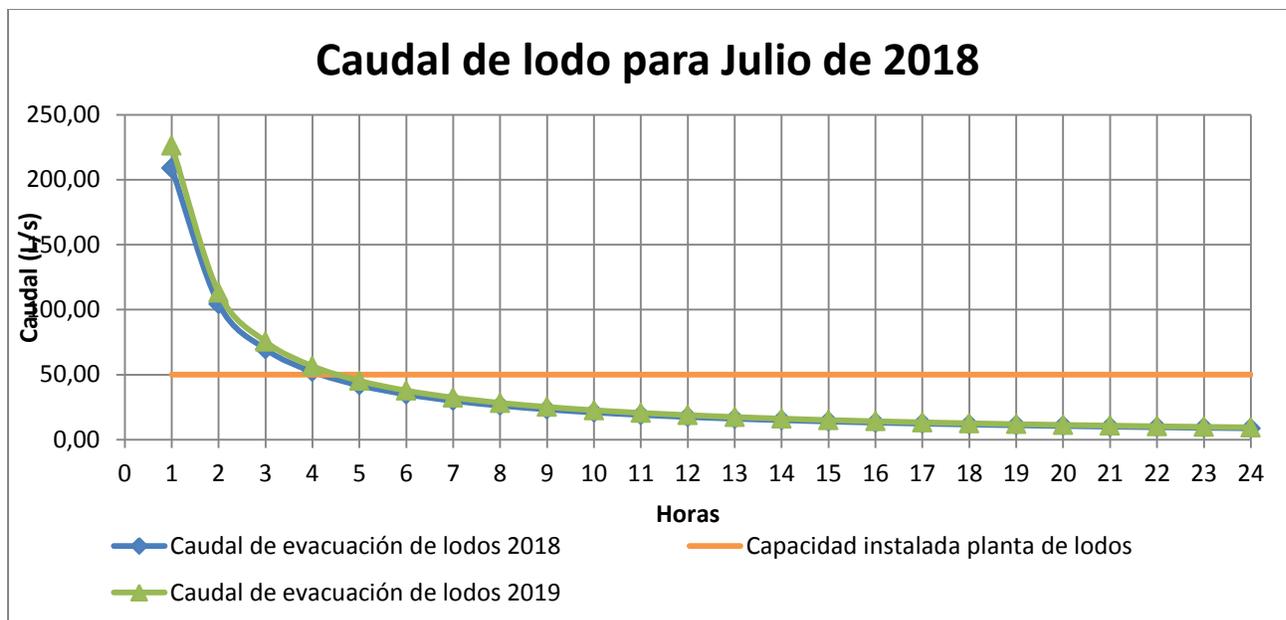


Anexo 16. Comportamiento de caudales promedio de evacuación de lodo en Junio 2018-2019
Fuente. Autores.

Anexo 17. Promedio de caudales de lodo en Julio 2018-2019.

Promedio de caudales en julio							
2018				2019			
Tiempo	Caudal(L/s)	Tiempo	Caudal(L/s)	Tiempo	Caudal (L/s)	Tiempo	Caudal (L/s)
1 Hora	208,99	13 Horas	16,08	1 Hora	226,39	13 Horas	17,41
2 Horas	104,5	14 Horas	14,93	2 Horas	113,19	14 Horas	16,17
3 Horas	69,66	15 Horas	13,93	3 Horas	75,46	15 Horas	15,09
4 Horas	52,25	16 Horas	13,06	4 Horas	56,6	16 Horas	14,15
5 Horas	41,8	17 Horas	12,29	5 Horas	45,28	17 Horas	13,32
6 Horas	34,83	18 Horas	11,61	6 Horas	37,73	18 Horas	12,58
7 Horas	29,86	19 Horas	11	7 Horas	32,34	19 Horas	11,92
8 Horas	26,12	20 Horas	10,45	8 Horas	28,3	20 Horas	11,32
9 Horas	23,22	21 Horas	9,95	9 Horas	25,15	21 Horas	10,78
10 Horas	20,9	22 Horas	9,5	10 Horas	22,64	22 Horas	10,29
11 Horas	19	23 Horas	9,09	11 Horas	20,58	23 Horas	9,84
12 Horas	17,42	24 Horas	8,71	12 Horas	18,87	24 Horas	9,43

Fuente. Autores.

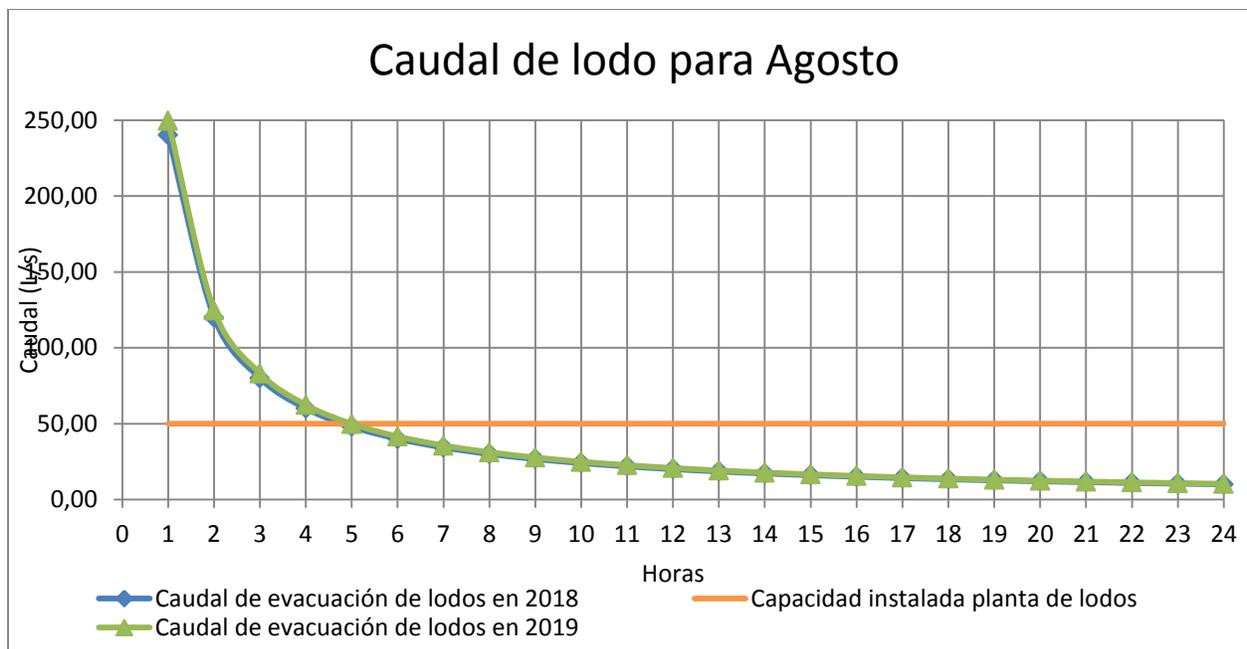


Anexo 18. Comportamiento de caudales promedio de evacuación de lodo en turbiedades bajas-2018.
Fuente. Autores.

Anexo 19. Promedio de caudales de lodo en turbiedades bajas-2018.

Caudales Promedio de Agosto							
2018				2019			
Tiempo	Caudal(L/s)	Tiempo	Caudal(L/s)	Tiempo	Caudal (L/s)	Tiempo	Caudal (L/s)
1 Hora	240,28	13 Horas	18,48	1 Hora	249,61	13 Horas	19,2
2 Horas	120,14	14 Horas	17,16	2 Horas	124,8	14 Horas	17,83
3 Horas	80,09	15 Horas	16,02	3 Horas	83,2	15 Horas	16,64
4 Horas	60,07	16 Horas	15,02	4 Horas	62,4	16 Horas	15,6
5 Horas	48,06	17 Horas	14,13	5 Horas	49,92	17 Horas	14,68
6 Horas	40,05	18 Horas	13,35	6 Horas	41,6	18 Horas	13,87
7 Horas	34,33	19 Horas	12,65	7 Horas	35,66	19 Horas	13,14
8 Horas	30,04	20 Horas	12,01	8 Horas	31,2	20 Horas	12,48
9 Horas	26,7	21 Horas	11,44	9 Horas	27,73	21 Horas	11,89
10 Horas	24,03	22 Horas	10,92	10 Horas	24,96	22 Horas	11,35
11 Horas	23,84	23 Horas	10,45	11 Horas	22,69	23 Horas	10,85
12 Horas	20,02	24 Horas	10,01	12 Horas	20,8	24 Horas	10,4

Fuente. Autores.



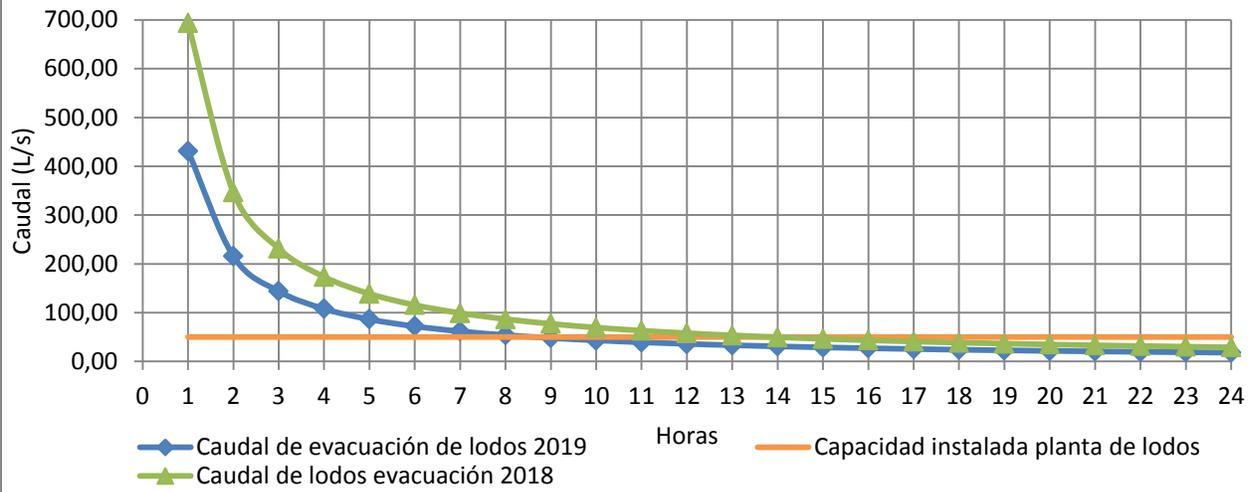
Anexo 20. Comportamiento de caudales promedio de evacuación de lodo en turbiedades Bajas-2018.
Fuente. Autores.

Anexo 21. Promedio de caudales de lodo en turbiedades altas-2018.

Promedio de caudales en Septiembre							
2018				2019			
Tiempo	Caudal(L/s)	Tiempo	Caudal(L/s)	Tiempo	Caudal(L/s)	Tiempo	Caudal(L/s)
1 Hora	693,55	13 Horas	53,35	1 Hora	431,23	13 Horas	33,17
2 Horas	346,77	14 Horas	49,54	2 Horas	215,61	14 Horas	30,8
3 Horas	231,18	15 Horas	46,24	3 Horas	143,74	15 Horas	28,75
4 Horas	173,39	16 Horas	43,35	4 Horas	107,81	16 Horas	26,95
5 Horas	138,71	17 Horas	40,8	5 Horas	86,25	17 Horas	25,37
6 Horas	115,59	18 Horas	38,53	6 Horas	71,87	18 Horas	23,96
7 Horas	99,08	19 Horas	36,5	7 Horas	61,6	19 Horas	22,7
8 Horas	86,69	20 Horas	34,68	8 Horas	53,9	20 Horas	21,56
9 Horas	77,06	21 Horas	33,03	9 Horas	47,91	21 Horas	20,53
10 Horas	69,35	22 Horas	31,52	10 Horas	43,12	22 Horas	19,6
11 Horas	63,05	23 Horas	30,15	11 Horas	39,2	23 Horas	18,75
12 Horas	57,8	24 Horas	28,9	12 Horas	35,94	24 Horas	17,97

Fuente. Autores.

Caudal de evacuación de lodos para Septiembre



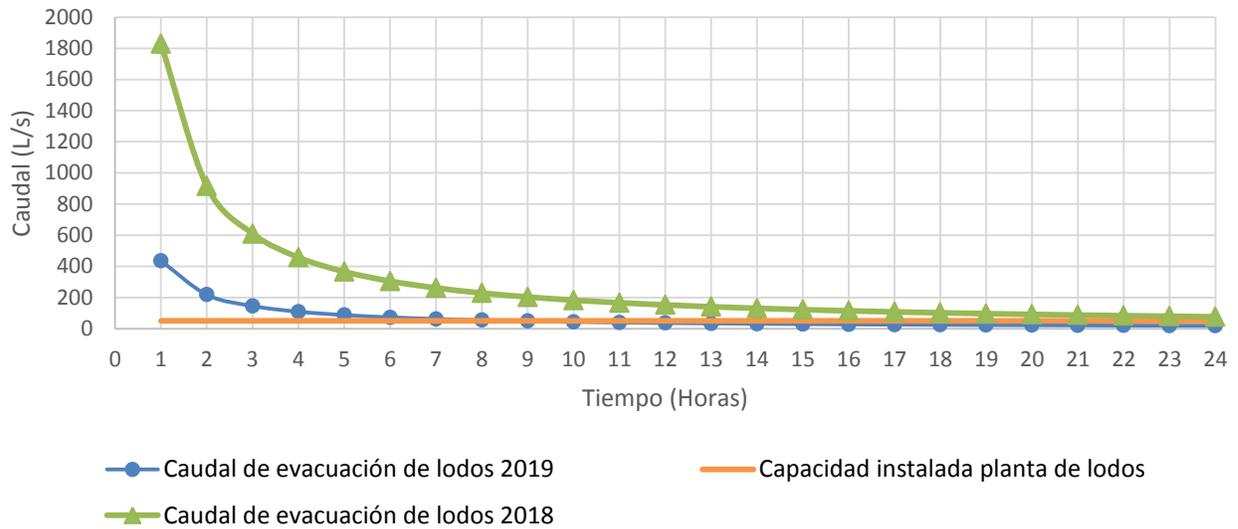
Anexo 22. Comportamiento de caudales promedio de evacuación de lodo en Septiembre 2018-2019.
Fuente. Autores.

Anexo 23. Promedio de caudales de lodo en turbiedades altas-2018.

Promedios caudales en Octubre							
2018				2019			
Tiempo	Caudal (L/s)	Tiempo	Caudal (L/s)	Tiempo	Caudal (L/s)	Tiempo	Caudal (L/s)
1 Hora	1829,51	13 Horas	140,73	1 Hora	435,62	13 Horas	33,51
2 Horas	914,76	14 Horas	130,68	2 Horas	217,81	14 Horas	31,12
3 Horas	609,84	15 Horas	121,97	3 Horas	145,21	15 Horas	29,04
4 Horas	457,38	16 Horas	114,34	4 Horas	108,90	16 Horas	27,23
5 Horas	365,90	17 Horas	107,62	5 Horas	87,12	17 Horas	25,62
6 Horas	304,92	18 Horas	101,64	6 Horas	72,60	18 Horas	24,20
7 Horas	261,36	19 Horas	96,29	7 Horas	62,23	19 Horas	22,93
8 Horas	228,69	20 Horas	91,48	8 Horas	54,45	20 Horas	21,78
9 Horas	203,28	21 Horas	87,12	9 Horas	48,40	21 Horas	20,74
10 Horas	182,95	22 Horas	83,16	10 Horas	43,56	22 Horas	19,80
11 Horas	166,32	23 Horas	79,54	11 Horas	39,60	23 Horas	18,94
12 Horas	152,46	24 Horas	76,23	12 Horas	36,30	24 Horas	18,15

Fuente. Autores

Caudal de evacuación de lodos en Octubre

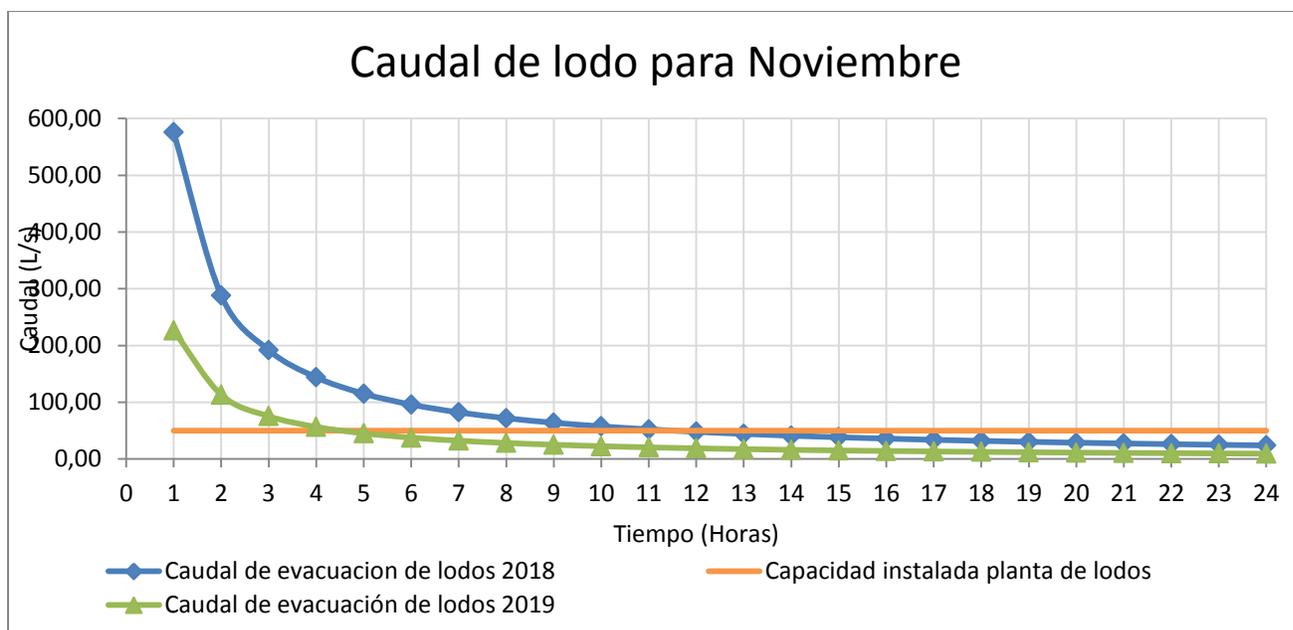


Anexo 24. Comportamiento de caudales promedio de evacuación de lodo en turbiedades altas-2018
Fuente. Autores.

Anexo 25. Promedio de caudales de lodo en Noviembre 2018-2019

Promedio de caudales en Noviembre							
2018				2019			
Tiempo	Caudal(L/s)	Tiempo	Caudal(L/s)	Tiempo	Caudal (L/s)	Tiempo	Caudal (L/s)
1 Hora	575,79	13 Horas	44,29	1 Hora	226,39	13 Horas	17,41
2 Horas	287,9	14 Horas	41,13	2 Horas	113,19	14 Horas	16,17
3 Horas	191,93	15 Horas	38,39	3 Horas	75,46	15 Horas	15,09
4 Horas	143,95	16 Horas	35,99	4 Horas	56,6	16 Horas	14,15
5 Horas	115,16	17 Horas	33,87	5 Horas	45,28	17 Horas	13,32
6 Horas	95,97	18 Horas	31,99	6 Horas	37,73	18 Horas	12,58
7 Horas	82,26	19 Horas	30,3	7 Horas	32,34	19 Horas	11,92
8 Horas	71,97	20 Horas	28,79	8 Horas	28,3	20 Horas	11,32
9 Horas	63,98	21 Horas	27,42	9 Horas	25,15	21 Horas	10,78
10 Horas	57,58	22 Horas	26,17	10 Horas	22,64	22 Horas	10,29
11 Horas	52,34	23 Horas	25,03	11 Horas	20,58	23 Horas	9,84
12 Horas	47,98	24 Horas	23,99	12 Horas	18,87	24 Horas	9,43

Fuente. Autores.

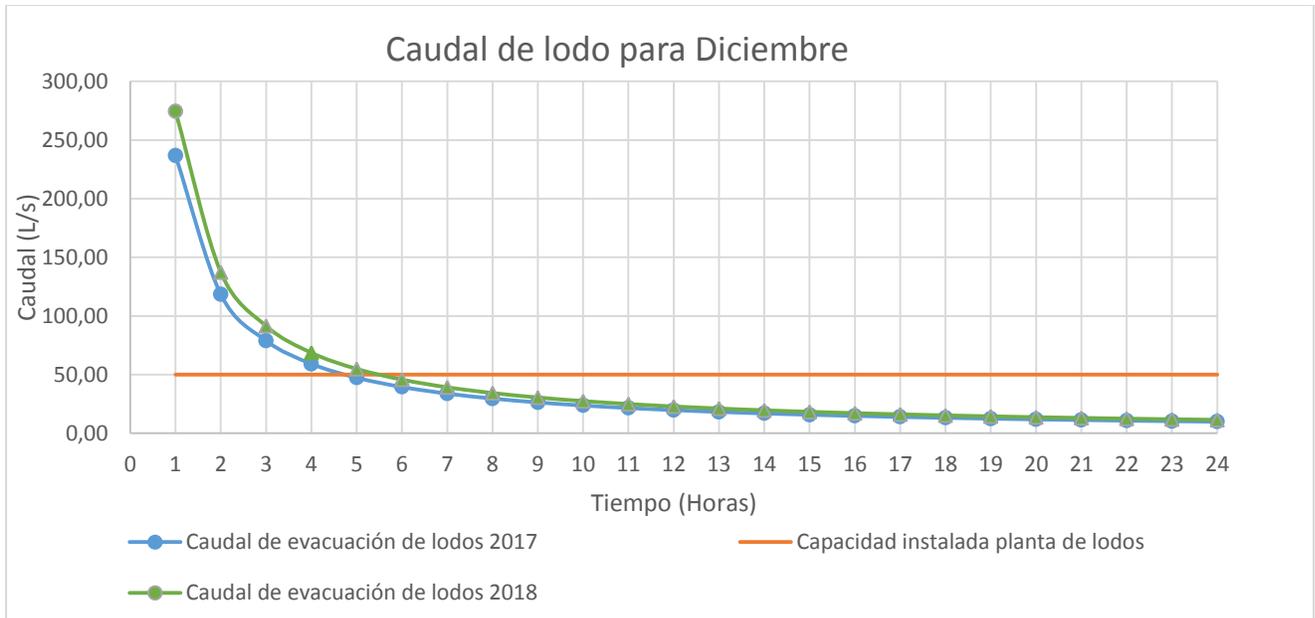


Anexo 26. Comportamiento de caudales promedio de evacuación de lodo en turbiedades bajas-2018
Fuente. Autores.

Anexo 27. Promedio de caudales de lodo en Diciembre 2017-2018.

Promedio de caudales en Diciembre							
2017				2018			
Tiempo	Caudal(L/s)	Tiempo	Caudal(L/s)	Tiempo	Caudal(L/s)	Tiempo	Caudal(L/s)
1 Hora	236,77	13 Horas	18,21	1 Hora	274,43	13 Horas	21,11
2 Horas	118,39	14 Horas	16,91	2 Horas	137,22	14 Horas	19,6
3 Horas	78,92	15 Horas	15,78	3 Horas	91,48	15 Horas	18,3
4 Horas	59,19	16 Horas	14,80	4 Horas	68,61	16 Horas	17,15
5 Horas	47,35	17 Horas	13,93	5 Horas	54,89	17 Horas	16,14
6 Horas	39,46	18 Horas	13,15	6 Horas	45,74	18 Horas	15,25
7 Horas	33,82	19 Horas	12,46	7 Horas	39,2	19 Horas	14,44
8 Horas	29,60	20 Horas	11,84	8 Horas	34,3	20 Horas	13,72
9 Horas	26,31	21 Horas	11,27	9 Horas	30,49	21 Horas	13,07
10 Horas	23,68	22 Horas	10,76	10 Horas	27,44	22 Horas	12,47
11 Horas	21,52	23 Horas	10,29	11 Horas	24,95	23 Horas	11,93
12 Horas	19,73	24 Horas	9,87	12 Horas	22,87	24 Horas	11,43

Fuente. Autores.



Anexo 28 Comportamiento de caudales promedio de evacuación de lodo en turbiedades bajas-2018.
Fuente. Autores.

Anexo 29. Concentración de sólidos de la primera dilución para pruebas de sedimentabilidad.

Inicial - 750 mL lodo + 250 mL agua								
		Sólidos sedimentables		Sólidos disueltos				
Número de Muestra	Volumen (mL)	Peso filtro limpio (g)	Peso filtro con muestra (g)	Peso Cápsula (g)	Peso cápsula después del Horno (g)	Sólidos Suspendidos (mg/L)	Sólidos disueltos (mg/L)	Sólidos Totales (mg/L)
C2R1	10	0,0791	0,1113	54,8083	54,8138	3220,00	550,00	3770,00
C2R2	10	0,0828	0,118	62,3141	62,3201	3520,00	600,00	4120
C2R3	10	0,0815	0,1145	57,7349	57,7398	3300,00	490,00	3790,00
Final - 750 mL lodo + 250 mL agua								
		Sólidos sedimentables		Sólidos disueltos				

Número de Muestra	Volumen (mL)	Peso filtro limpio (g)	Peso filtro con muestra (g)	Peso cápsula (g)	Peso cápsula después del Horno (g)	Sólidos Suspendedos (mg/L)	Sólidos disueltos (mg/L)	Sólidos Totales (mg/L)
C2R1	10	0,0798	0,7677	64,1597	64,1684	68790,00	870,00	69660,00
C2R2	10	0,1191	0,8687	59,3612	59,3686	74960,00	740,00	75700
C2R3	10	0,1207	0,8687	54,1591	54,1658	74800,00	670,00	75470,00

Fuente. Autores.

Anexo 30. Concentraciones sólidos de la segunda dilución para pruebas de sedimentabilidad.

Inicial - 500 mL lodo + 500 mL agua								
Número de Muestra	Volumen (mL)	Sólidos sedimentables		Sólidos disueltos		Sólidos Suspendedos (mg/L)	Sólidos disueltos (mg/L)	Sólidos Totales (mg/L)
		Peso filtro limpio (g)	Peso filtro con muestra (g)	Peso cápsula (g)	Peso cápsula después del Horno (g)			
C3R1	10	0,0822	0,1002	53,9218	53,928	1800,0000	620,00	2420,00
C3R2	10	0,0871	0,1064	40,2236	40,2304	1930,0000	680,00	2610
C3R3	10	0,0848	0,103	51,3961	51,4025	1820,0000	640,00	2460,00
Final - 500 mL lodo + 500 mL agua								
Número de Muestra	Volumen (mL)	Sólidos sedimentables		Sólidos disueltos		Sólidos Suspendedos (mg/L)	Sólidos disueltos (mg/L)	Sólidos Totales (mg/L)
		Peso filtro limpio (g)	Peso filtro con muestra (g)	Peso cápsula (g)	Peso cápsula después del Horno (g)			
C3R1	10	0,1196	0,8355	55,9381	55,9427	71590,0000	460,00	72050,00
C3R2	10	0,0803	0,755	56,7693	56,7738	67470,0000	450,00	67920
C3R3	10	0,0812	0,5656	50,1366	50,1373	48440,0000	70,00	48510,00

Fuente. Autores.

Anexo 31. Concentración de sólidos de la tercera dilución para pruebas de sedimentabilidad.

Inicial - 250 mL lodo + 750 mL agua								
Número de Muestra	Volumen (mL)	Sólidos sedimentables		Sólidos disueltos		Sólidos Suspendidos (mg/L)	Sólidos disueltos (mg/L)	Sólidos Totales (mg/L)
		Peso filtro limpio (g)	Peso filtro con muestra (g)	Peso cápsula (g)	Peso cápsula después del Horno (g)			
C4R1	10	0,1193	0,1322	57,4966	57,5019	1290,00	530,0000	1820,00
C4R2	10	0,0941	0,1047	118,0393	118,0439	1060,00	460,0000	1520
C4R3	10	0,0977	0,1085	57,3652	57,3681	1080,00	290,0000	1370,00
Final - 250 mL lodo + 750 mL agua								
Número de Muestra	Volumen (mL)	Sólidos sedimentables		Sólidos disueltos		Sólidos Suspendidos (mg/L)	Sólidos disueltos (mg/L)	Sólidos Totales (mg/L)
		Peso filtro limpio (g)	Peso filtro con muestra (g)	Peso cápsula (g)	Peso cápsula después del Horno (g)			
C4R1	10	0,081	0,5794	51,6081	51,611	49840,0	290,0000	50130,0
C4R2	10	0,0964	0,7747	117,1365	117,1391	67830,0	260,0000	68090
C4R3	10	0,0966	0,5222	50,4749	50,4784	42560,0	350,0000	42910,0

Fuente. Autores.

Anexo 32. Altura de la lámina de lodo sin diluir.

Muestra de lodo - 1000 mL				
Tiempo (Minutos)	R1	R2	R3	Promedio
0,33	998	996	997	997
0,67	886	920	950	918,6667
1	800	820	850	823,3333
1,33	600	600	650	616,6667
1,67	500	500	550	516,6667
2	330	330	370	343,3333
2,33	220	160	280	220
3,33	170	140	190	166,6667
4,33	180	130	170	160
5,33	165	120	160	148,3333
6,33	155	115	155	141,6667

7,33	150	110	150	136,6667
10,33	140	100	140	126,6667
13,33	130	95	130	118,3333
16,33	125	90	120	111,6667
19,33	120	88	115	107,6667
24,33	110	82	110	100,6667
29,33	109	80	102	97
34,33	102	75	100	92,33333
44,33	95	70	90	85
54,33	90	68	88	82
64,33	88	62	82	77,33333
74,33	85	60	80	75
84,33	80	60	79	73
99,33	79	59	74	70,66667
114,33	78	58	72	69,33333
129,33	72	55	70	65,66667
144,33	70	55	69	64,66667
159,33	70	55	69	64,66667

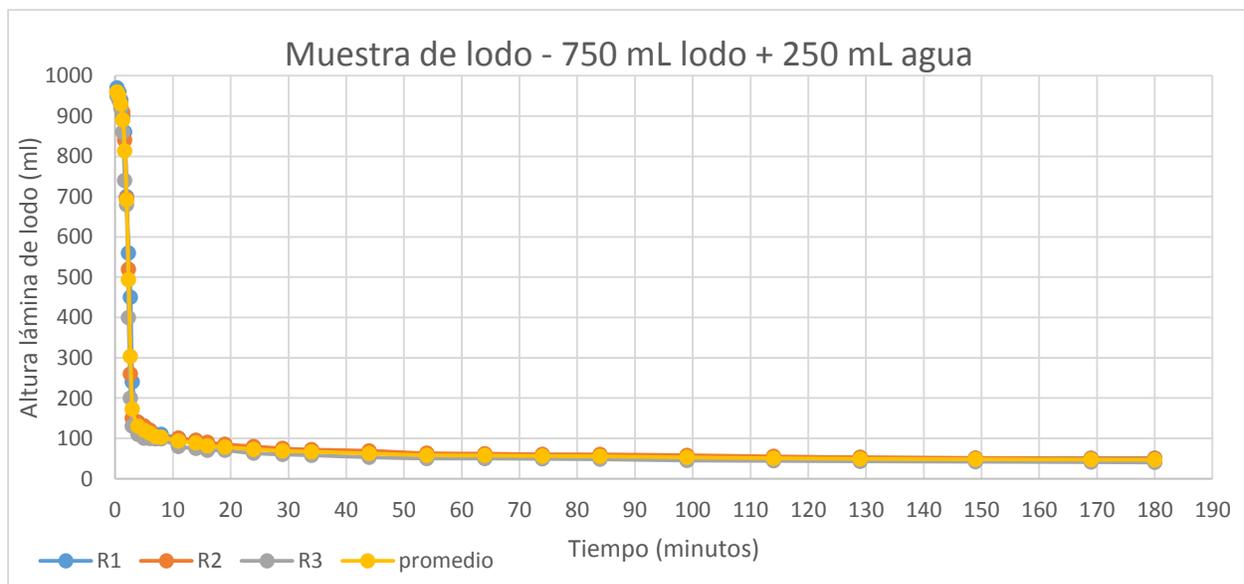
Fuente. Autores.

Anexo 33. Altura de la lámina de lodo diluido con 250 ml de agua.

Muestra de lodo - 750 mL + 250 ml agua				
Tiempo (minutos)	R1	R2	R3	Promedio
0,33	970	960	950	960
0,67	960	950	940	950
1	940	930	920	930
1,33	900	910	860	890
1,67	860	840	740	813,3333
2	700	696	680	692
2,33	560	520	400	493,3333
2,66	450	260	200	303,3333
3	240	150	130	173,3333
4	140	140	110	130
5	130	130	100	120
6	120	120	99,5	113,1667
7	110	105	99	104,6667
8	110	100	99	103
11	100	100	80	93,33333
14	95	95	75	88,33333

16	85	90	70	81,66667
19	80	85	70	78,33333
24	76	80	63	73
29	71	75	60	68,66667
34	70	72	58	66,66667
44	65	69	53	62,33333
54	61	63	50	58
64	60	62	50	57,33333
74	59	60	49	56
84	58	60	48	55,33333
99	55	58	45	52,66667
114	53	55	44	50,66667
129	52	53	43	49,33333
149	51	51	42	48
169	51	50	41	47,33333
180	51	50	40	47

Fuente. Autores.



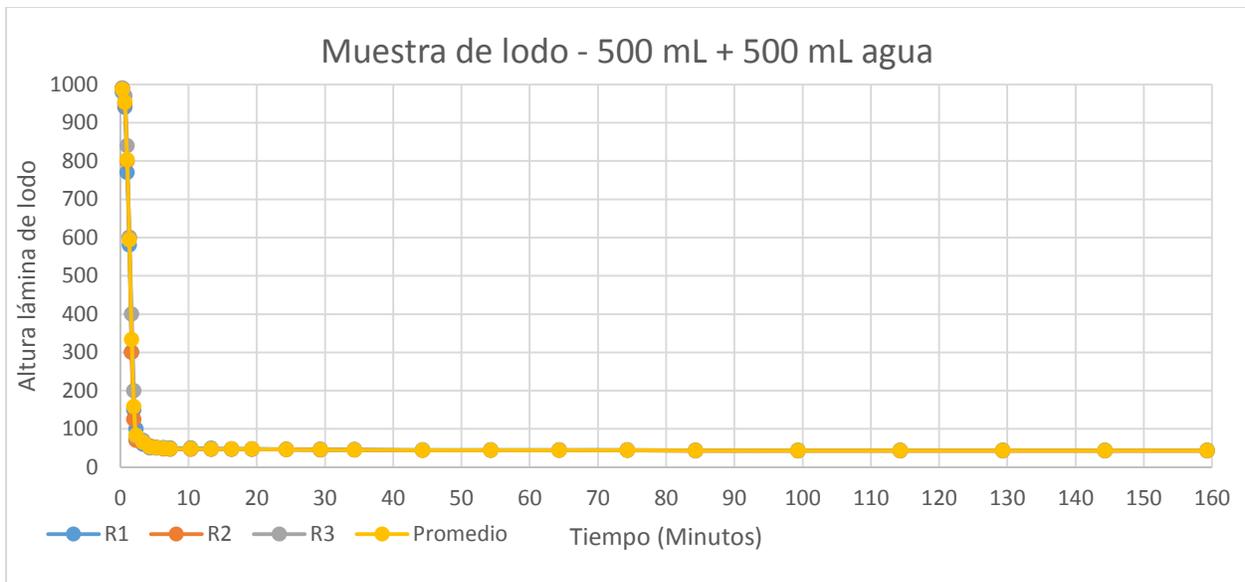
Anexo 34. Curva de sedimentación de lodos para 75% de lodo.

Fuente. Autores.

Anexo 35. Altura de la lámina de lodo diluida con 500 ml de agua.

Muestra de lodo - 500 mL + 500 mL agua				
Tiempo (Minutos)	R1	R2	R3	Promedio
0,33	980	990	990	986,6667
0,67	940	950	970	953,3333
1	770	800	840	803,3333
1,33	580	600	600	593,3333
1,67	300	300	400	333,3333
2	150	125	200	158,3333
2,33	100	70	80	83,33333
3,33	60	65	70	65
4,33	55	55	50	53,33333
5,33	52	50	50	50,66667
6,33	51	48	49	49,33333
7,33	50	47	48	48,33333
10,33	50	47	48	48,33333
13,33	49	47	47	47,66667
16,33	48	47	47	47,33333
19,33	48	47	47	47,33333
24,33	47	46	46	46,33333
29,33	47	45	45	45,66667
34,33	46	45	45	45,33333
44,33	45	44	44	44,33333
54,33	45	44	44	44,33333
64,33	45	44	44	44,33333
74,33	45	44	44	44,33333
84,33	44	43	43	43,33333
99,33	44	43	43	43,33333
114,33	44	43	43	43,33333
129,33	44	43	43	43,33333
144,33	44	43	43	43,33333
159,33	44	43	43	43,33333

Fuente. Autores.



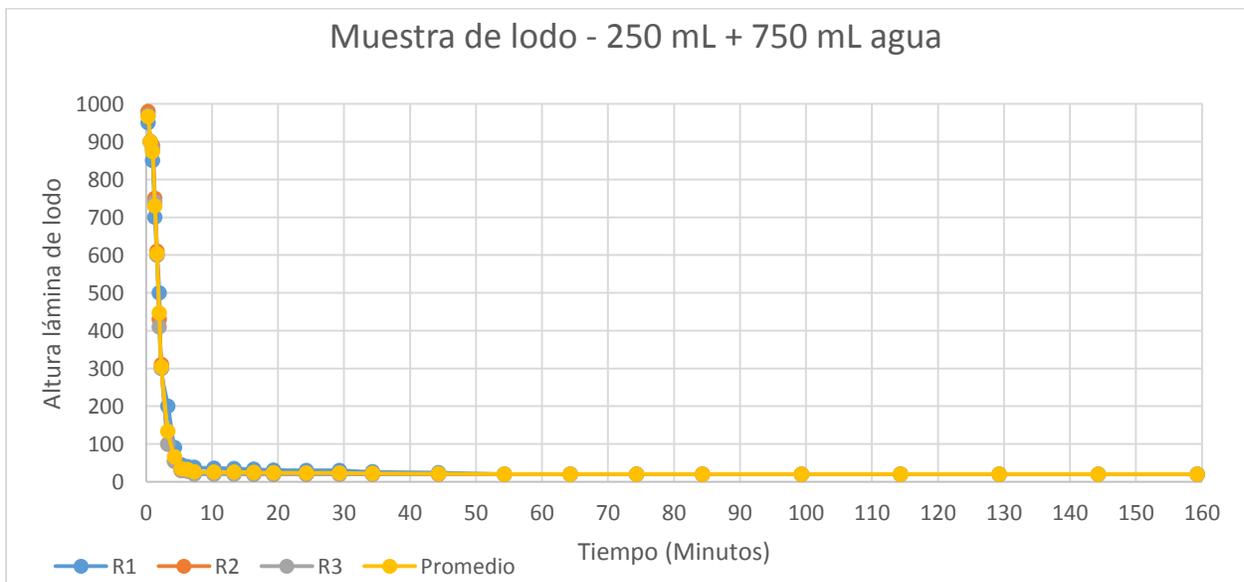
Anexo 36. Curva de sedimentación de lodos para 50% de lodo.
Fuente. Autores.

Anexo 37. Altura de la lámina de lodo diluida con 250 ml de agua.

Muestra de lodo - 250 mL + 750 mL agua				
Tiempo (Minutos)	R1	R2	R3	Promedio
0,33	950	980	970	966,6667
0,67	900	900	900	900
1	850	890	880	873,3333
1,33	700	750	740	730
1,67	600	610	600	603,3333
2	500	430	410	446,6667
2,33	300	310	300	303,3333
3,33	200	100	100	133,3333
4,33	90	54	54	66
5,33	45	30	30	35
6,33	40	28	28	32
7,33	38	22	20	26,66667
10,33	36	21	20	25,66667
13,33	35	21	20	25,33333
16,33	33	20	20	24,33333
19,33	31	20	20	23,66667
24,33	30	20	20	23,33333
29,33	30	20	20	23,33333
34,33	26	20	20	22

44,33	24	20	20	21,33333
54,33	20	20	20	20
64,33	20	20	20	20
74,33	20	20	20	20
84,33	20	20	20	20
99,33	20	20	20	20
114,33	20	20	20	20
129,33	20	20	20	20
144,33	20	20	20	20
159,33	20	20	20	20

Fuente. Autores.



Anexo 38. Curva de sedimentación de lodos para 50% de lodo.

Fuente. Autores.