



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DIDÁCTICO
DE UN SEDIMENTADOR TIPO LAMELLA

AUTOR

Carla Vanessa Oñate Negrete

AÑO

2018



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DIDÁCTICO DE UN
SEDIMENTADOR TIPO LAMELLA

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y
Remediación.

Profesor guía

M.Sc. Santiago Daniel Piedra Burgos

Autora

Carla Vanessa Oñate Negrete

Año

2018

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido el trabajo, Diseño y construcción de un modelo didáctico de un sedimentador de tipo Lamellar, a través de reuniones periódicas con la estudiante Carla Vanessa Oñate Negrete, en el semestre 2018-2, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

Santiago Daniel Piedra Burgos

Master of Science in Hydro Science and Engineering

C.I: 1715384150

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, Diseño y construcción de un modelo didáctico de un sedimentador de tipo Lamellar, de la estudiante, Carla Vanessa Oñate Negrete, en el semestre 2018-2, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Daniel Hernán Hidalgo Villalba
Magister en Ciencias Especialización Ingeniería Ambiental
C.I.:1801914449

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”

Carla Vanessa Oñate Negrete
C.I:0503494635

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente el apoyo de mi familia; mis padres, son mi ejemplo de esfuerzo y sacrificio perseverante, a mi hermano, por comprenderme y siempre creer en mí. Mauricio, por brindarme tu apoyo incondicional cada día. Son luz en mi vida.

A mis profesores; Ing. Santiago Piedra por su motivación al realizar este proyecto. Ing. Daniel Hidalgo por su entrega, esfuerzo, y entusiasmo transmitido en cada enseñanza.

A mi amigo Luis Felipe por siempre estar presente.

DEDICATORIA

A mi padre, por guiarme con su sabiduría e inteligencia, siempre has sido y será mi mentor de vida. A mi madre, mi admiración infinita en ti, por tu calidez y dedicación que nos brindas cada día. Santiago, mi hermano, mi fuerza y apoyo diario para seguir adelante. Gracias por siempre creer en mí. Ningún logro sería completo sin su compañía.

Resumen

Con el fin de implementar un modelo didáctico en el laboratorio de aguas de la Universidad de las Américas, se realizó la construcción de un sedimentador de tipo Lamellar, esta unidad de tratamiento cumple con el proceso de sedimentación de alta tasa.

Previo a su elaboración, se realizó un análisis teórico para concebir los conceptos y criterios de diseño requeridos. Adicionalmente, se realizaron ensayos para determinar la velocidad de sedimentación y remoción de las partículas floculentas empleando una columna de sedimentación, en un agua residual industrial, con sólidos en suspensión. Obtenido dicho valor, se prosiguió a la realización del modelamiento de la unidad, y a la elaboración tanto de los planos de corte como de los planos de diseño.

Como resultado se obtuvo la construcción de un sedimentador de tipo Lamellar que posee un volumen de $0,46 \text{ m}^3$, que admite un caudal de 40 l/m , elaborado con acrílico transparente de 9 mm de grosor. Finalmente se realizó un ensayo para evidenciar el funcionamiento del tanque con agua residual sintética, comprobándose su correcto funcionamiento en la remoción de los flóculos.

Abstract

In order to implement a didactic model in the water laboratory of the University of the Americas, the construction of a Lamellar-type settler was carried out, this treatment unit complies with the high-rate sedimentation process.

Prior to its preparation, a theoretical analysis was carried out to conceive the concepts and design criteria required. Additionally, tests were carried out to determine the sedimentation rate and removal of flocculent particles using a sedimentation column, in industrial wastewater, with suspended solids. Once this value was obtained, the modeling of the unit was continued, as well as the preparation of the cutting planes and the design plans.

As a result, the construction of a Lamellar-type settler with a volume of 0.46 m^3 was obtained, which allows a flow rate of 40 l/m , made with 9 mm thick transparent acrylic. Finally, an assay was carried out to demonstrate the operation of the tank with synthetic residual water, verifying its correct functioning in the removal of the flocs.

ÍNDICE

1. Capítulo I. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Alcance.....	3
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general.....	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
2. Capítulo II. Marco Teórico	4
2.1. Agua residual	4
2.2. Tratamiento de aguas residuales	4
2.3. Clasificación de tratamiento de aguas residuales	5
2.3.1. Tratamiento preliminar.....	5
2.3.2. Tratamiento primario.....	6
2.3.3. Tratamiento secundario	6
2.3.4. Tratamiento terciario.....	6
2.4. Sedimentación.....	7
2.4.1. Sedimentación tipo 1	8
2.4.2. Sedimentación tipo 2	8
2.4.3. Sedimentación de alta tasa	9
3. Capítulo III. Metodología	13
3.1. Diseño	13
3.1.1 Cálculo y Dimensionamiento	14
3.1.1.1 Determinación de la velocidad de sedimentación.....	14
3.1.1.2 Determinación de la velocidad del fluido	19
3.1.1.3 Modelado y Construcción	19
3.1.1.4. Ensayo en la unidad de tratamiento	20
4. Capítulo IV. Resultados y Discusión	22
4.1. Diseño	23
4.2. Velocidad de sedimentación.....	23
4.2.1. Dosis óptima de coagulante	23

4.2.2. Ensayo en la columna de sedimentación	24
4.3. Velocidad del fluido	29
4.3.1. Construcción.....	30
4.3.1.5. Cuerpo del sedimentador	30
4.4. Modelo didáctico	32
4.5. Costo de construcción	32
4.6. Ensayo en la unidad de tratamiento	33
5. Conclusiones y Recomendaciones	37
5.1. Conclusiones.....	37
5.2. Recomendaciones.....	38
REFERENCIAS.....	39
ANEXOS	43

1. Capítulo I. Introducción

1.1. Antecedentes

En la actualidad, con la creciente industrialización y urbanización a nivel mundial, se ha originado la extracción de agua dulce a 3.928 km³ por año (Food and Agriculture Organization [FAO], 2013). Se estima que el 44% de esta agua se consume, principalmente en actividades de agricultura a través de la evaporación en tierras de cultivo de regadío y el 56% restante (2.212 km³ por año) son liberados al medio ambiente como aguas residuales en forma de efluentes municipales e industriales y agua de drenaje agrícola (United Nations Educational Scientific and Cultural Organization [UNESCO], 2017).

Las aguas residuales se componen aproximadamente del 99% de agua y 1% de sólidos suspendidos, coloidales, disueltos y otros tipos de componentes (Bahadori & Smith, 2016, p. 485). En la actualidad, su producción se ha incrementado de forma continua, elevando al 80% sus descargas al ambiente, y originando consecuencias, tales como: generación de efectos perjudiciales en la salud humana; producción de impactos ambientales negativos y la creación adversa de repercusiones en las actividades económicas (UNESCO, 2017).

Los diversos métodos convencionales para el tratamiento de aguas residuales están presentes desde la antigüedad, pero son muy costosos. De manera que se han introducido métodos técnicos, ecológicos e innovadores, para optimizar las metodologías de tratamiento (Simate, 2015, p. 1277). Por esta razón, numerosos trabajos de modernización en plantas de tratamiento de aguas residuales y estaciones de purificación de agua se están llevando a cabo en Europa y otros continentes (Ochowiak, Matuszak, Włodarczak, Ancukiewicz, & Krupińska, 2017).

Una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) es una instalación dividida en tres etapas: preliminar o pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario; que involucran diversos procesos como, físicos, químicos

y biológicos, para tratar las aguas residuales y eliminar los contaminantes (Metcalf & Eddy, 2014, p. 4), Generalmente poseen pantallas de barras mecánicas o manuales, empleadas para la eliminación de sólidos de gran tamaño, en tanto a la extracción de arena se emplean tanques; seguidamente en necesario una pre-aireación para dar paso al proceso de sedimentación, en donde, se busca la remoción de sólidos sedimentables por medio de procesos como coagulación y floculación (Anjum, Al-Makishah, & Barakat, 2016).

Posterior a ello el tratamiento biológico, efectúa la degradación de la materia orgánica soluble y suspendida. Finalmente, el tratamiento terciario cumple con la remoción de los compuestos inorgánicos, materiales en suspensión, microorganismos que no han sido eliminados en los tratamientos previos (Asthana, Kumar, & Sharma, 2017, p. 191). Cualquier sistema debe poseer el nivel mínimo de tratamiento aceptable, es decir, la eliminación de sólidos sedimentables en suspensión y compuestos orgánicos biodegradables, más desinfección como es el tratamiento secundario (Malato, Oller, Fernández-Ibáñez, & Fuerhacker, 2010).

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales generalmente requieren mucho capital y elevados costos de operación especializados (Malato et al., 2010, p. 28). La selección de tecnologías debe ser ambientalmente sostenible, adecuada a las condiciones locales, aceptable para los usuarios y asequible para quienes deben pagar por ellas. Así también, las soluciones simples y fácilmente replicables, deben permitir una mayor actualización, con un desarrollo posterior que pueda ser operado y mantenido por la comunidad local, siendo apropiadas y rentables (Bringezu, 2018, p. 34).

En consecuencia, es necesario estudiar una tecnología de tratamiento de aguas residuales adecuada, que permita analizar la rentabilidad y evidenciar su correcto funcionamiento, es así, como el presente trabajo se ajusta al estudio del funcionamiento de un sedimentador de tipo lamellar, focalizándose en el tratamiento secundario, debido a su nivel de importancia en una PTAR. De esta

forma, mediante un esquema sistemático para su dimensionamiento, diseño y construcción busca plantear y estudiar las diferentes optimizaciones por brindar.

1.2. Alcance

El presente proyecto aborda el diseño y construcción de un tanque sedimentador de tipo Lamellar, a escala piloto. Como primer punto se desarrolló el diseño del tanque sedimentador, en función a ecuaciones establecidas, obteniendo así el dimensionamiento respectivo. Posteriormente, se efectuó el modelamiento de la unidad de tratamiento, determinando conjuntamente la velocidad de sedimentación y el porcentaje de remoción de partículas floculentas en una columna de sedimentación experimental, y de esta manera se procedió a la etapa de construcción, previo la elaboración de planos de diseño y corte. Por último, se ejecutó un ensayo en el tanque sedimentador con agua residual sintética para determinar evidenciar su funcionamiento.

1.3. Justificación

Es necesario poseer diferentes mecanismos lúdicos desarrollados por la academia, los cuales permitan conocer diferentes modelos experimentales que contribuyan con el perfeccionamiento de mecanismos proyectados en la mejora continua de tecnologías y comprensión del tratamiento de aguas residuales. Es así, que el desarrollo de un modelo a escala de un sedimentador tipo Lamellar permitirá conocer con más detalle el funcionamiento del sistema integrado y a su vez en un futuro establecer variables que proporcionen más información del funcionamiento.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Construir un modelo didáctico de un sedimentador tipo Lamella

1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar la unidad de tratamiento
- Elaborar los planos de diseño y construcción de la unidad de tratamiento
- Construir la unidad de tratamiento

2. Capítulo II. Marco Teórico

2.1. Agua residual

Se definen como efluentes que han sido utilizados previamente para fines domésticos, industriales o agrícolas. Su nivel de toxicidad y tratamiento varía dependiendo de su origen o tipo de residuo (Bahadori & Smith, 2016, p. 485).

2.2. Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales es el conjunto de procesos, métodos o técnicas diseñados para eliminar sólidos o contaminantes de las aguas residuales (Bahadori & Smith, 2016, p. 460). Para su el tratamiento adecuado es necesario implantar un sistema integrado de gestión de aguas residuales con elementos funcionales tales como la generación y composición; la recolección; el tratamiento y la eliminación y reutilización (Abbassi & Baz, 2008, p. 30).

Con base en el conocimiento de las aguas residuales, se puede determinar el diseño de la planta de tratamiento, teniendo en cuenta las aguas residuales a tratar. En este sentido, las mediciones son útiles; si tales mediciones no existen, se debe hacer una estimación. Con respecto al volumen de aguas residuales futuras, el desarrollo debe ser proyectado (Tondera, Blecken, Chazarenc, Lucke, & Tanner, 2018).

2.3. Clasificación de tratamiento de aguas residuales

A continuación, se presenta una adaptación de la clasificación del tratamiento más empleada.

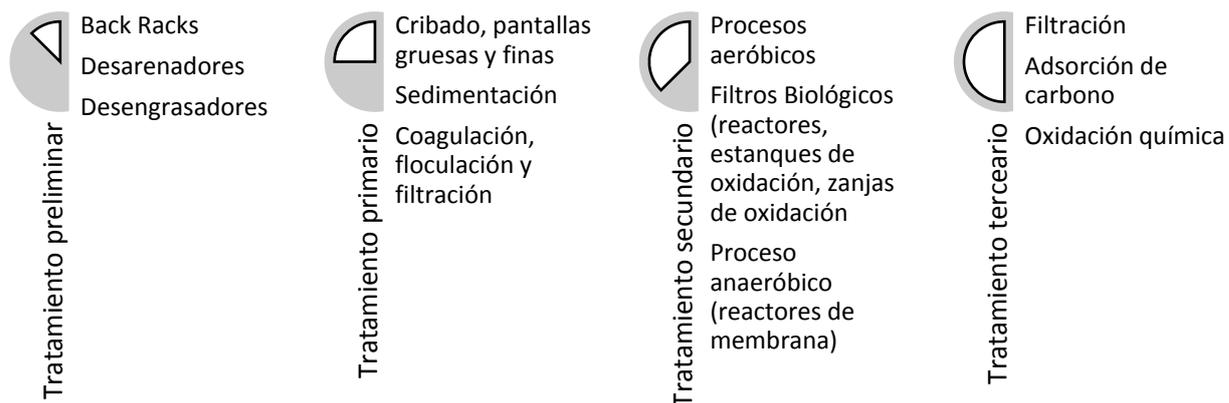


Figura 1. Tipos de tratamiento de aguas residuales.

Adaptado de (Asthana, Kumar, & Sharma 2017; Metcalf & Eddy, 2014, p. 536)

2.3.1. Tratamiento preliminar

Empleado esencialmente en el tratamiento de aguas residuales en donde se eliminan partículas gruesas y otros materiales de gran tamaño, puesto que, al no ser procesados podría obstruir el flujo a través de la planta de tratamiento o dañar el equipo (Santín, Pedret, & Vilanova, 2017). La eliminación de estos materiales es necesario para mejorar la operación y el mantenimiento de las unidades de tratamiento posteriores. Dichos elementos pueden ocasionar daños, no obstante, generalmente reducen las condiciones de flujo máximo y permiten que una planta más pequeña trate el flujo de aguas residuales (Asthana et al., 2017, p. 180).

2.3.2. Tratamiento primario

El objetivo principal del tratamiento primario es depurar los sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables y eliminar los materiales en suspensión existentes en el agua residual (Asthana et al., 2017, p. 180). Aproximadamente el 25-50% de la demanda biológica de oxígeno es eliminada, así también, el 50-70% del total de sólidos en suspensión y el 65% del aceite y la grasa se eliminan durante el tratamiento primario (Jones, Freeman, & Sánchez-Rodríguez, 2017).

2.3.3. Tratamiento secundario

En la etapa de sedimentación primaria, una vez producido un líquido generalmente homogéneo, y haber adquirido un lodo que puede procesarse, se determina apto para ser tratado biológicamente. El tratamiento secundario está diseñado para degradar sustancialmente el contenido biológico, eliminar los orgánicos residuales y los sólidos suspendidos presente en las aguas residuales (Metcalf & Eddy, 2014, p. 356). Se incluyen procesos aeróbicos basados en la eliminación de los contaminantes orgánicos por su transformación en biomasa bacteriana, CO₂ y H₂O y procesos anaeróbicos en el cual transforman la sustancia orgánica en biogás, mezcla de metano y CO₂ (Scholz, 2016, p. 38).

2.3.4. Tratamiento terciario

El tratamiento terciario de aguas residuales se emplea cuando se deben eliminar componentes específicos de aguas residuales que no se pueden eliminar mediante un tratamiento secundario, como nitrógeno, fósforo y metales pesados (Asthana et al., 2017, p. 191). Cada tratamiento terciario está diseñado para eliminar ciertos elementos, por lo que es completamente posible que una planta emplee varios procesos de tratamiento terciario, dependiendo de la composición y características del flujo de aguas residuales que eliminan tipos específicos de residuos por filtración, adsorción; oxidación química que eliminan sustancias

orgánicas, nitrógeno, fósforo; ozonización; cloración y radiación UV (Tondera et al., 2018, p. 30).

2.4. Sedimentación

La sedimentación es un proceso necesario en el tratamiento de aguas residuales, donde son eliminados los sólidos sedimentables por gravedad (De, 2017, p. 49). La sedimentación se basa en la diferencia de densidad entre la mayor parte del líquido y las partículas sólidas, lo que da como resultado la sedimentación de los sólidos presentes (Asthana et al., 2017, p. 193). Esta operación se lleva a cabo como parte no solo del tratamiento primario, sino también, en el tratamiento secundario para la separación de sólidos generados en el tratamiento biológico, como lodos (Davidson & Summerfelt, 2005, p. 50). Adicional, su clasificación está dada por:

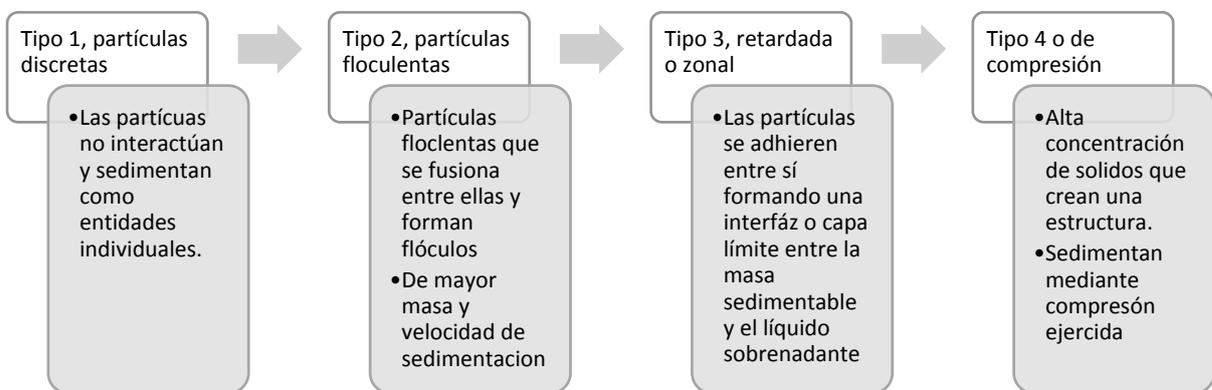


Figura 2. Tipos de sedimentación.

Adaptado de (Metcalf & Eddy, 2014, p.12; Tondera et al., 2018)

Las partículas en suspensión sedimentan de diferente forma, debido a su naturaleza y concentración, por tanto, se puede mencionar que la sedimentación de partículas discretas, en el proceso de sedimentación no alteran su forma, tamaño y densidad; a diferencia de las partículas floculentas que se originan por la coalescencia de partículas coloides desestabilizadas, a razón de la aplicación

de agentes sintéticos; y de partículas de caída libre, cuando presentan una baja concentración (Romero, 2002, p. 134).

2.4.1. Sedimentación tipo 1

Refiere a la sedimentación de partículas discretas, aquellas que no cambian su forma, tamaño o peso a medida que se sedimentan, en este tipo de sedimentación no es interferida (Romero, 2002, p. 121). Para una solución discreta, se pueden hacer cálculos sobre la velocidad de sedimentación de las partículas individuales. En un tanque de decantación, estos se mueven hacia abajo y hacia la zona de salida con el flujo de agua. Las partículas que alcanzan el fondo antes de la salida se separarán del efluente mientras que el resto pasará a través del tanque de decantación (Asthana et al., 2017, p. 173).

2.4.2. Sedimentación tipo 2

En el caso de una sedimentación de partículas floculentas para que la conglomeración de partículas sea más grande, depende de varios factores, tales como, la naturaleza y la velocidad de coalescencia (Asthana et al., 2017, p. 193). El volumen y la densidad de las partículas varían a medida que se aglutinan unas con otras a través del proceso de floculación y precipitación química. Seguidamente el peso de la partícula, la fuerza de arrastre, se modifican y la estabilidad de fuerzas verticales se rompe; generando que la velocidad de asentamiento de las partículas cambien con el tiempo y la profundidad (Romero, 2002, p. 134)

Un análisis teórico no es factible debido a la interacción de partículas que depende, entre otros factores, de la tasa de desbordamiento, la concentración de partículas y la profundidad del tanque (Scholz, 2016, p. 40), por tanto, se emplea una columna de sedimentación para evaluar las características de

sedimentación de las partículas floculentas. El mismo tipo de columna que usa solo un puerto de muestreo puede usarse para estudiar el asentamiento discreto (Camp, 1946, p. 898)

2.4.3. Sedimentación de alta tasa

En la sedimentación de tasa alta los sedimentadores son empleados en la remoción de los sólidos suspendidos en módulos de tubos circulares, cuadrados, hexagonales, de placas paralelas, placas onduladas o de distintas formas (Romero, 2002, p. 138). La reducción de la distancia de sedimentación da mayor eficiencia al proceso, permitiendo la extracción de lodos (Metcalf & Eddy, 2014, p. 354).

- **Coagulación floculación**

La coagulación-floculación es un proceso comúnmente utilizado para el tratamiento de agua cruda y, en particular, el tratamiento de aguas residuales. El proceso de coagulación-floculación tiene como objetivo hacer crecer las partículas coloidales mediante la desestabilización de las partículas suspendidas y luego la formación de flóculos por adsorción y agregación. Los flóculos formados se decantarán y luego se filtrarán (Ayeche, 2012). Su aplicación incluye la eliminación de especies químicas disueltas y la turbidez del agua mediante la adición de coagulantes químicos convencionales, policloruro de aluminio, cloruro de hierro o sulfato de aluminio, a menudo se utilizan en la primera operación (Choumane et al., 2017). Los usos del proceso se detallan a continuación:

- a. Remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no pueda sedimentar rápidamente.
- b. Remoción de color verdadero y aparente.
- c. Eliminación de bacteria, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.

- d. Destrucción de algas y plancton en general.
- e. Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos o compuestos orgánicos en otros.

2.4.3.1. Sedimentador de placas inclinadas tipo Lamellar

Los sedimentadores de placas inclinadas o Lamellar son dispositivos de asentamiento poco profundos que se componen de placas apiladas con geometrías variadas, que se utilizan para mejorar las características de sedimentación, figura 3 (Metcalf & Eddy, 2014, p. 358). Al proporcionar placas paralelas en el tanque de sedimentación se permite que los sólidos lleguen a la superficie después de una corta distancia de sedimentación, así también al inclinar las superficies en un ángulo, los sólidos pueden deslizarse desde la superficie de la placa, hasta ser depositados en la zona donde se acumulan los lodos (Crittenden, Trussell, Hand, Howe, & Tchbanoglous, 2012, p. 683)

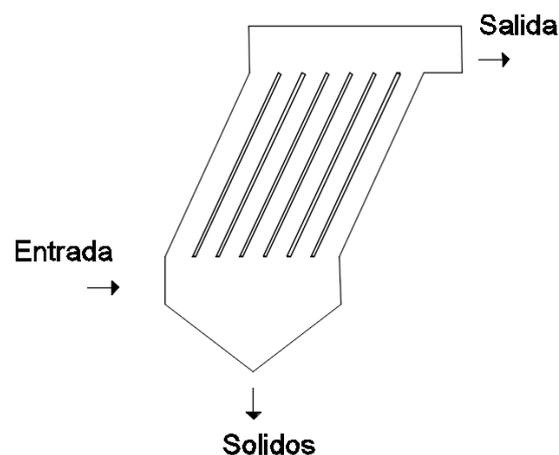


Figura 3. Diseño general de un sedimentador Lamellar.

Adaptado de Crittenden et al., 2012, p. 683

Existen fórmulas establecidas para determinar parámetros de diseño a contracorriente cuando el influente ingresa al sedimentador y fluye en dirección a la parte inferior atravesando el área de las placas. Crittenden et al. (2012, p.

684) establece cálculos para el dimensionamiento y funcionamiento a continuación descritos.

El tiempo de estabilización para que una partícula se pueda mover entre las placas paralelas está dado por la siguiente expresión:

$$t = \frac{d}{V_s \times \cos \theta}$$

Ecuación 1

Donde:

t = tiempo de sedimentación, s

d = distancia entre dos placas paralelas (placas perpendiculares), m

V_s = velocidad de sedimentación de partículas, m / s

θ = ángulo de inclinación de las placas, grados

Si se asume que la velocidad es uniforme, entonces el tiempo recorrido de la partícula en las placas está dado por la siguiente ecuación:

$$t_p = \frac{L_p}{V_{f\theta} - V_s \sin \theta}$$

Ecuación 2

t_p = tiempo que recorre de la partícula en las placas, s

L_p = longitud de la placa, m

$v_{f\theta}$ = velocidad del fluido en el canal, m/s

Si se considera la trayectoria de una partícula como se muestra en la figura 4; entonces todas las partículas con velocidad de sedimentación se eliminan y el tiempo de recorrido es igual al tiempo de estabilización. Como se muestra en la ecuación 3.

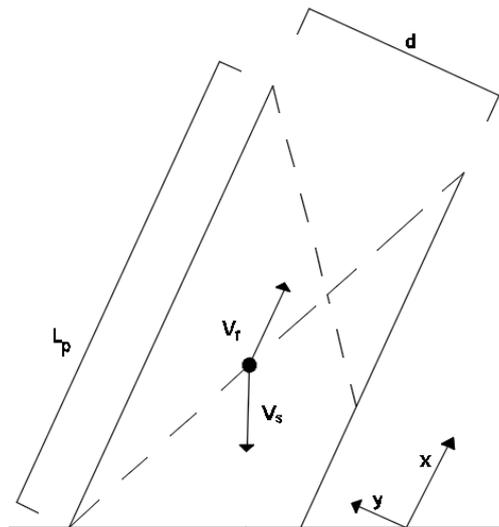


Figura 4. Flujo contra corriente.

Adaptado de (Crittenden et al. 2012, p. 683)

$$V_s \geq \frac{V_{f\theta} \times d}{L_p \cos \theta + d \sin \theta}$$

La velocidad del fluido $V_{f\theta}$ se determina en función al número de canales del sedimentador:

$$V_{f\theta} = \frac{Q}{N \times d \times w}$$

Ecuación 3

Donde:

$V_{f\theta}$ = velocidad del fluido (m/s)

Q = caudal (m³/s)

N = número de canales, adimensional

d = distancia entre dos placas paralelas (m)

w = ancho del canal (m)

Según Metcalf & Eddy (2014, p. 401) para que el proceso de sedimentación ocurra en el sedimentador tipo Lamelar es necesario un tratamiento previo del agua, tales como, coagulación- floculación, dado que los sólidos poco

sedimentables y no sedimentables cambian sus características para poder ser susceptibles de sedimentación.

En tanto al tamaño de partícula o la disminución de la distancia que debe caer antes de la eliminación, esto se logra mediante la coagulación y la floculación antes del proceso de sedimentación (Romero, 2002, p. 138). El coagulante y el polímero se inyectan en las aguas residuales afluentes antes de entrar en la zona de floculación. Cuando el agua residual acondicionada químicamente pasa a través de cada una de las zonas de floculación, el gradiente de energía de mezcla disminuye a medida que el agua residual pasa a la siguiente etapa (Metcalf & Eddy, 2014, p. 402).

El agua residual químicamente acondicionada floculada, continuamente pasa al sedimentador de láminas paralelas para la separación de sólidos. Una parte del agua desbordante del sedimentador se puede reciclar al afluente del proceso para mejorar la sedimentación, o todo el desbordamiento puede ser enviado a un tanque de espesamiento y a las instalaciones de procesamiento de sólidos (Crittenden et al., 2012, p. 684).

3. Capítulo III. Metodología

3.1. Diseño

El modelo didáctico a escala se desarrolló en el Laboratorio de Aguas (L12) de la Universidad de las Américas, sede Queri. Para el proceso de diseño fue preciso remitirse a los criterios de diversos autores (Crittenden et al., 2012, p. 683; Metcalf & Eddy, 2014, p. 358; Romero, 2002, p. 138), los que permitieron establecer los lineamientos y bases de diseño a seguir. El valor del caudal de entrada se estableció previamente en 40 l/min, dada el área asignada al presente proyecto.

La construcción del modelo se efectuó con láminas de acrílico transparente, espesor 9 mm, debido a su resistencia a impactos, larga durabilidad y para que,

a su vez, permitiera la visualización del proceso de sedimentación de forma eficaz.

3.1.1 Cálculo y Dimensionamiento

3.1.1.1 Determinación de la velocidad de sedimentación

Para el diseño del modelo, uno de los parámetros más importantes es la velocidad de sedimentación. En función a los cuatro tipos de sedimentación existentes mencionados con anterioridad, la tendencia de interacción y concentración varía, por tanto, es un factor crítico para juzgar la veracidad del modelo de sedimentación, controlar la eficiencia de suspensión de partículas concentradas y mantener un flujo con mayor estabilidad (Cheremisinoff, 2002).

En consecuencia, se realizaron ensayos para orientar el análisis a sedimentación tipo 2 (para partículas floculentas) por medio de una columna de sedimentación, como lo propuso Camp (1946, p. 898) en donde, a más de la velocidad de sedimentación, se determinó el porcentaje de remoción de las partículas floculentas. Para llevar a cabo los ensayos se trabajó con agua de tipo industrial debido a su funcionalidad conveniente por el tipo de modelo didáctico en cuestión.

La metodología experimental se dividió en dos etapas. En la primera etapa, se efectuó los procesos de coagulación-floculación para determinar la relación o dosis óptima de coagulante que requiere el agua de tipo industrial para ser tratada. En la segunda etapa, con el valor establecido, se efectuó una relación respecto al volumen con el cual se llenó la columna de sedimentación para proceder al ensayo con la cantidad de coagulante necesario.

a) Determinación de dosis optima

Previo a la determinación de la dosis óptima, se midió la turbiedad inicial del agua a través del espectrofotómetro (Macherey-Nagel, Nanocolor D500), el cual determina el total de partículas disueltas en suspensión por un haz de luz que atraviesa la muestra en cuestión.

Se utilizó el equipo, test de jarras de laboratorio (JLT-6, Velp Scientifica, Itali) para efectuar los procesos de coagulación-floculación. Así, se eligió el ploricloruro de aluminio como coagulante experimental, dada su alta velocidad de reacción, eficiente formación de flóculos y mejora en la remoción de color y turbidez (Xue, Gao, Li, & Sun, 2018). El volumen de agua residual empleado fue de 1000 ml con un total de trece tratamientos debido al incremento de dosificación de coagulante, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1

Niveles de tratamiento para el proceso de coagulación floculación

Tratamientos													
Nivel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Dosis (ul/l)	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	100	120	130

Respecto a las condiciones de operación se estableció una mezcla rápida de 100 rpm durante un minuto, en donde se agregó el coagulante con una dosis inicial de 30 microlitros por muestra; una vez efectuada la mezcla, se redujo la velocidad de rotación de las paletas giratorias a 40 rpm por 30 minutos, finalizada la mezcla lenta se dejó sedimentar por 1 hora.

Posteriormente se midió el parámetro de turbidez final de cada tratamiento, con igual metodología que para la turbiedad inicial, pero tomando la muestra a 5 cm de la superficie del agua en la jarra como se evidencia a continuación.

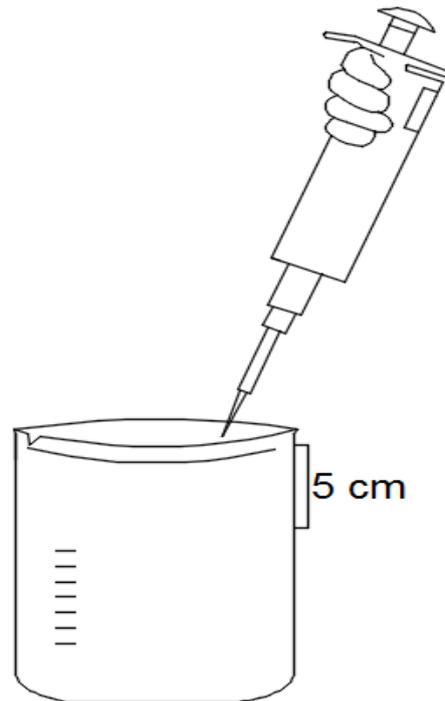


Figura 5. Esquema de la toma de muestra.

b) Ensayo en la columna de sedimentación

Se efectuó empleando una columna de tubo transparente con 2,45 m de longitud y diámetro de 0,16 m, el cual posee 5 válvulas para la toma de muestras, ubicadas a 45 cm una de otra, y una entrada para el flujo de aire ubicado en la parte inferior.

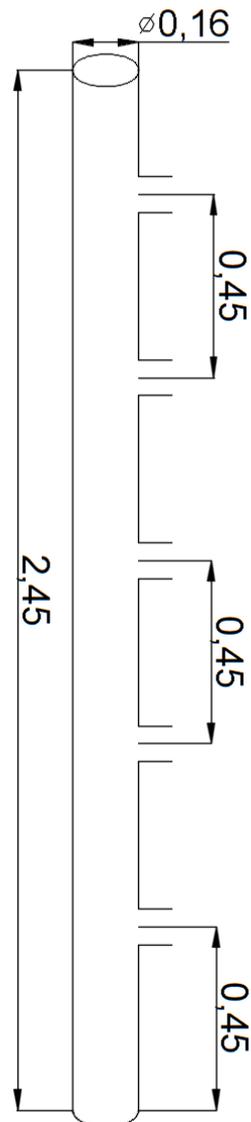


Figura 6. Representación de la columna de sedimentación, unidades expresada en metros.

De acuerdo con la dosis óptima de coagulante establecido en la primera etapa se determinó el valor proporcional necesario del mismo para el volumen de agua residual con el cual se llenó la columna, como se evidencia en el anexo 2. Luego de obtener el valor se inyectó el coagulante (policloruro de aluminio), realizando una mezcla rápida con el sistema de aireación por un minuto, pasado el tiempo se redujo la presión de aire continuando por 30 minutos más.

Transcurrido el tiempo de mezclado, se tomaron las muestras de agua residual considerables para poder determinar el parámetro de turbiedad remanente de cada muestra a diferentes alturas iniciando por la parte superior, se midió el descenso de altura del agua residual respectivamente, por tres horas con intervalos como se muestra a continuación.

Tabla 2

Intervalo de muestreo en la columna de sedimentación

Intervalo o (min)	5						10				20		30		
Tiempo (min)	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	80	100	120	150	180

A partir de los datos de turbiedad tomados de cada muestra se calculó el porcentaje de turbiedad removida, con la siguiente expresión.

$$\% \text{ Turbiedad removida} = \left(1 - \frac{T_1}{T_0}\right) \times 100$$

Ecuación 4

Donde:

T_1 = Valor de turbiedad de cada muestra (NTU)

T_0 = Valor inicial de turbiedad de la muestra (NTU)

De esta manera se graficó el tiempo del ensayo vs el porcentaje de turbiedad removida, para los 4 puntos de muestreo tomados a diferentes distancias. En función a esta gráfica se estimó el tiempo de remoción del sistema de partículas en relación con el porcentaje de remoción de turbidez a diferentes alturas correspondientemente. La velocidad de sedimentación se calculó con la ecuación 2,

$$V_s = \frac{H_f}{t_1}$$

Ecuación 5

Donde:

H_1 = altura final

t_1 = tiempo

- **Remoción de las partículas floculentas**

Con los datos del tiempo de remoción vs la altura final se construyó una gráfica, con cada valor estimado por su porcentaje de remoción, seguidamente se procedió a trazar curvas de iso remoción cada 10%. Posteriormente se estimó la profundidad correspondiente a cada curva por su porcentaje de remoción, siendo dividida a la altura final, es decir 1,48 m, obteniendo de esta manera un promedio de las eficiencias. Finalmente, con la ecuación 3, se determinó el porcentaje total de remoción del sistema para cada curva.

$$R = A + (B - A) \frac{h_B}{h_f} + (C - B) \frac{h_C}{h_f} + (D - C) + \frac{h_D}{h_f} \dots + (G - F) \frac{h_G}{h_f}$$

Ecuación 6

Donde:

A, B, C,...G = valor porcentual de remoción de cada curva trazada

$h_B, h_C, h_D, \dots h_G,$ = profundidad de cada curva trazada por su porcentaje de remoción

h_f = altura final

3.1.1.2 Determinación de la velocidad del fluido

Se calcula en función a la relación del caudal perteneciente al fluido el cual ingresa a la unidad de tratamiento y la sección transversal del mismo; de acuerdo con la ecuación 3, descrita anteriormente

3.1.1.3 Modelado y Construcción

Como primer paso se recolectaron todos los valores determinados en el cálculo del dimensionamiento del modelo didáctico, para dar inicio a la etapa de elaboración, tanto de los planos de corte, como de construcción, empleado el software AutoCAD 2016.

Una vez desarrollados los planos de corte para las 3 planchas de acrílico (1,80 x 1,20 m.) se dispuso a cortar mediante tecnología láser; seguidamente se llevó a cabo la etapa de construcción, ensamblando cada parte del modelo. Se realizaron perforaciones en puntos específicos de vulnerabilidad para unir las piezas con tornillos y conjuntamente inyectar un solvente (cloruro de metilo) por medio de una jeringa, para que su pegado conserve mayor resistencia en las juntas.

En tanto a las placas inclinadas que posee el modelo en la parte interna, se consideró el ángulo y la separación de estas con precisión. En la tolva rectangular se instaló a presión, en una de las caras, una llave de paso de bronce, roscable, de $\frac{3}{4}$ in, de igual forma, para la salida del fluido se colocó una unión de plástico de $\frac{3}{4}$ in. Posteriormente para facilitar la movilización del modelo didáctico, fue necesario elaborar una estructura de soporte la cual cumpla su función asumiendo el peso que puede llegar a tener el modelo

Finalmente se realizaron pruebas de fugas para verificar el correcto funcionamiento del modelo.

3.1.1.4. Ensayo en la unidad de tratamiento

a) Determinación de dosis óptima

El ensayo en el tanque sedimentador de tipo lamellar se llevó a cabo con agua residual sintética, la composición del agua se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 3

Composición del agua residual sintética

Componente	Cantidad (mg/L)
Gelatina	34
Almidón	171
Leche en polvo	102
Jabón de tocador	3

Se prepararon 6 litros de agua residual sintética, para poder efectuar la determinación de dosis óptima en el test de jarras de laboratorio, siguiendo el mismo protocolo anteriormente realizado con el agua de tipo industrial, a diferencia de la reducción de dosis debido a los 6 niveles de tratamiento.

Tabla 4

Niveles de tratamiento para el proceso de coagulación floculación para el agua residual sintética.

Tratamientos						
Nivel	1	2	3	4	5	6
Dosis (ul/l)	50	60	70	80	90	100

b) Ensayo

Para la ejecución del ensayo, posterior a haber determinado el valor de dosis óptima de coagulante, se calculó el valor proporcional requerido para 200 litros de agua residual, definidos para conseguir utilizar el tanque sedimentador a su completa capacidad.

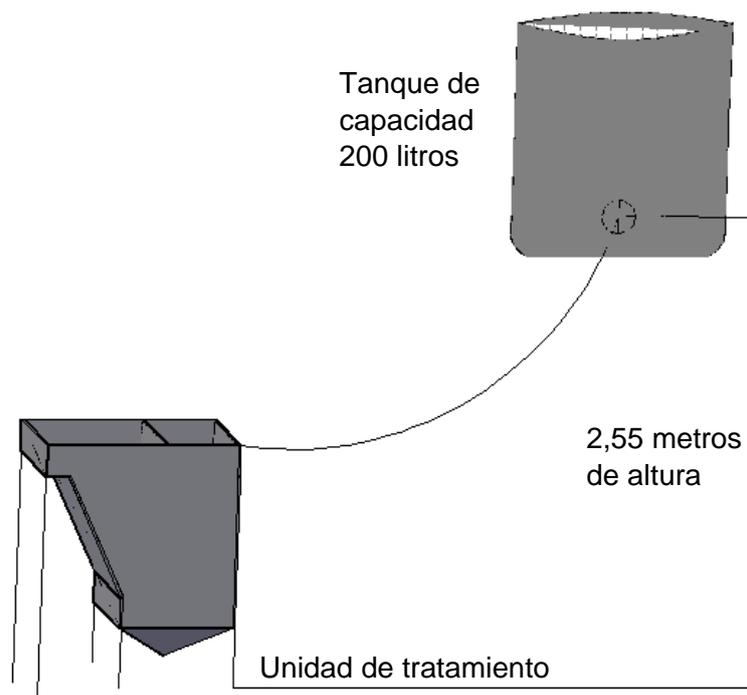


Figura 7. Representación esquemática de la colocación para la realización del ensayo.

En un tanque plástico con capacidad para 200 litros, se efectuó la conexión de una válvula en la parte inferior del tanque, con el objetivo de dirigir el agua residual sintética a la unidad de tratamiento, y se colocó el mismo a una altura considerable para que tenga carga hidráulica. Se preparó la cantidad definida de agua residual y se procedió a la coagulación – floculación; para evitar la sedimentación de los flóculos en el tanque de abastecimiento, se procedió con una mezcla lenta de forma continua. Previamente se llenó el tanque sedimentador con agua cruda, y se conectó la válvula del tanque de plástico para evidenciar el ingreso del agua residual sintética y la sedimentación en las distintas secciones de la unidad.

4. Capítulo IV. Resultados y Discusión

4.1. Diseño

Las medidas que se emplearon para construir el modelo didáctico en base bibliográfica se detallan a continuación.

Tabla 5

Parámetros con los cuales se diseñó el modelo didáctico

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Espacio entre placas	d	m	0,06
Número de canales	N	m	6
Largo de las placas cuadradas	Lp	m	0,6
Inclinación de placas	θ	grados	65°
Inclinación en la tolva	θ	grados	35°

Nota: El espacio entre cada placa según (Robescu, Mandiş, & Robescu, 2010, p. 214; Romero, 2002, p. 138) se recomienda en un mínimo de 0,05 m, se estableció para el diseño a escala de 0,06 m. La inclinación de las placas paralelas según Metcalf & Eddy (2014, p. 139), puede ser de 60° en adelante, Yao (1970, p. 218) concuerda con dicho valor como ángulo de inclinación ideal; para la mejora de la auto limpieza en la zona, se estimó un ángulo de 65° para él diseño.

4.2. Velocidad de sedimentación

4.2.1. Dosis óptima de coagulante

Tabla 6

Resultados del proceso de coagulación floculación

Dosis (ul/l)	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	100	120	130
Turbiedad (NTU)	123,5	78,2	68	61,3	24,9	23,6	23,1	9,9	12	16,3	16,8	21,8	22,8

Nota: Los ensayos efectuados se evidencia en el anexo 1.

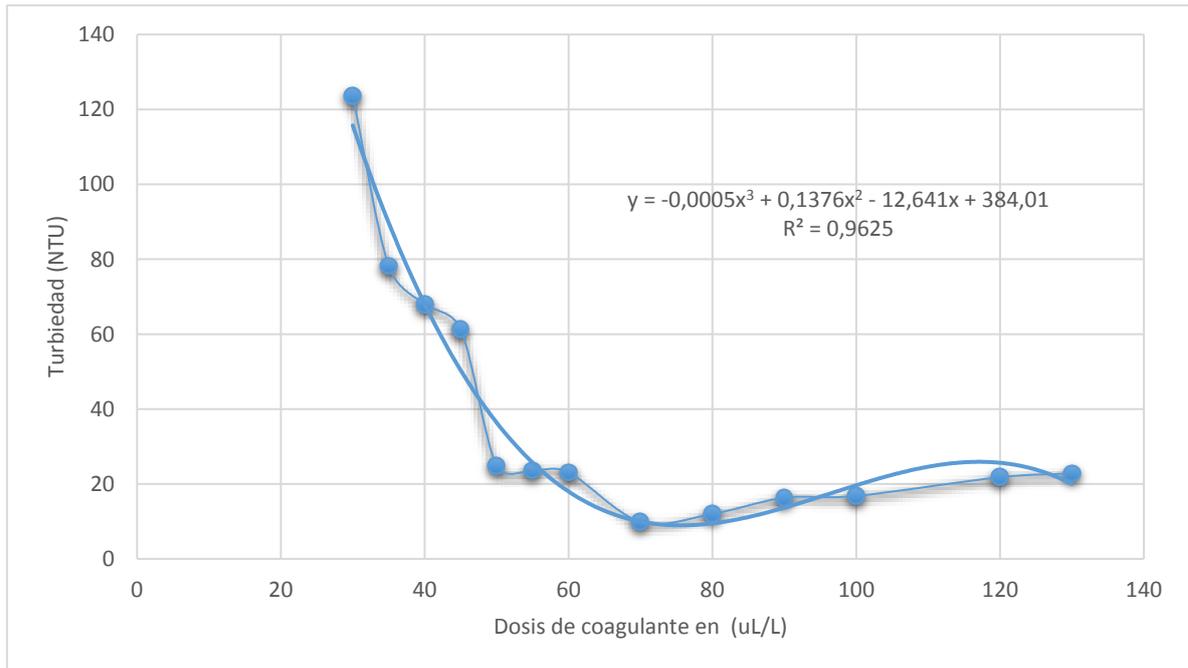


Figura 8. Comportamiento del valor de turbiedad determinado en función a la dosis aplicada de coagulante.

El modelo sigue un comportamiento polinómico; a medida que la dosis de coagulante se incrementó, la remoción de partículas fue ascendiendo. Sin embargo, con 70 uL/L de coagulante es evidente que las partículas se removieron en su mayoría, fijándose como el punto óptimo, dado que es el más bajo de la curva, en donde se produjo la aglutinación necesaria de coloides, si se emplearía dosis mayores, se produciría una sobresaturación, generando la alteración de la carga de la partícula originando microfloculos, que al poseer tamaños muy reducidos, su velocidad de sedimentación disminuiría (Brandt et al., 2017).

4.2.2. Ensayo en la columna de sedimentación

La dosis de coagulante aplicada en la columna de 40,37 litros fue de 28.3 ml/l, en la cual por tres horas se tomaron un total de 52 muestras para determinar el valor de turbiedad final. El valor inicial de turbiedad del agua cruda fue de 345,65 NTU

Tabla 7

Valores de turbiedad determinados en la toma de muestra a diferentes alturas en la columna de sedimentación

Intervalo	Tiempo (min)	Muestras				Altura (cm)
		M1	M2	M3	M4	
5	0	314,2	352,2	355,7	360,5	193
	5	110,4	139,9	163,3	164,3	189
	10	100,5	114,7	117,3	128,9	186,5
	15	92,1	111,4	112,0	112,5	185,5
	20	85,0	103,4	104,5	106,0	184,5
	25	81,9	101,8	105,2	113,9	183,5
	30		97,9	101,8	103,1	182,5
10	40		87,1	90,2	90,5	180,5
	50		88,2	90,4	94,6	179,7
	60		84,6	87,2	88,3	179,2
20	80		88,3	92,2	93,5	178,7
	100		87,6	88,0	89,6	178,2
	120		83,3	86,2	86,6	177,7
30	150		82,2	84,7	87,5	177,2
	180		82,2	84,1	84,5	176,7

Aplicando la ecuación 4, se pudo determinar el porcentaje de turbiedad removida de cada muestra como indica la tabla 5.

Tabla 8

Porcentaje de turbiedad removida por cada muestra tomada

Tiempo (min)	Altura (cm)			
	H1	H2	H3	H4
5	68%	60%	53%	52%
10	71%	67%	66%	63%
15	73%	68%	68%	67%
20	75%	70%	70%	69%
25	76%	71%	70%	67%
30		72%	71%	70%
40		75%	74%	74%
50		74%	74%	73%
60		76%	75%	74%
80		74%	73%	73%
100		75%	75%	74%

120		76%	75%	75%
150		76%	75%	75%
180		76%	76%	76%

Nota: El porcentaje de turbiedad tomado en los primeros 5 minutos fue de 68% desde la primera toma de muestra en la parte superior hasta llegar al 52% como valor determinado en la cuarta muestra, siendo adecuado el proceso de remoción de sólidos suspendidos. A partir de los 30 minutos no se tomó más la primera muestra, dado que el nivel del agua no se encontraba a la altura de la válvula. La efectividad del proceso llegó a un máximo de remoción de sólidos suspendidos del 76% completado el tiempo del ensayo.

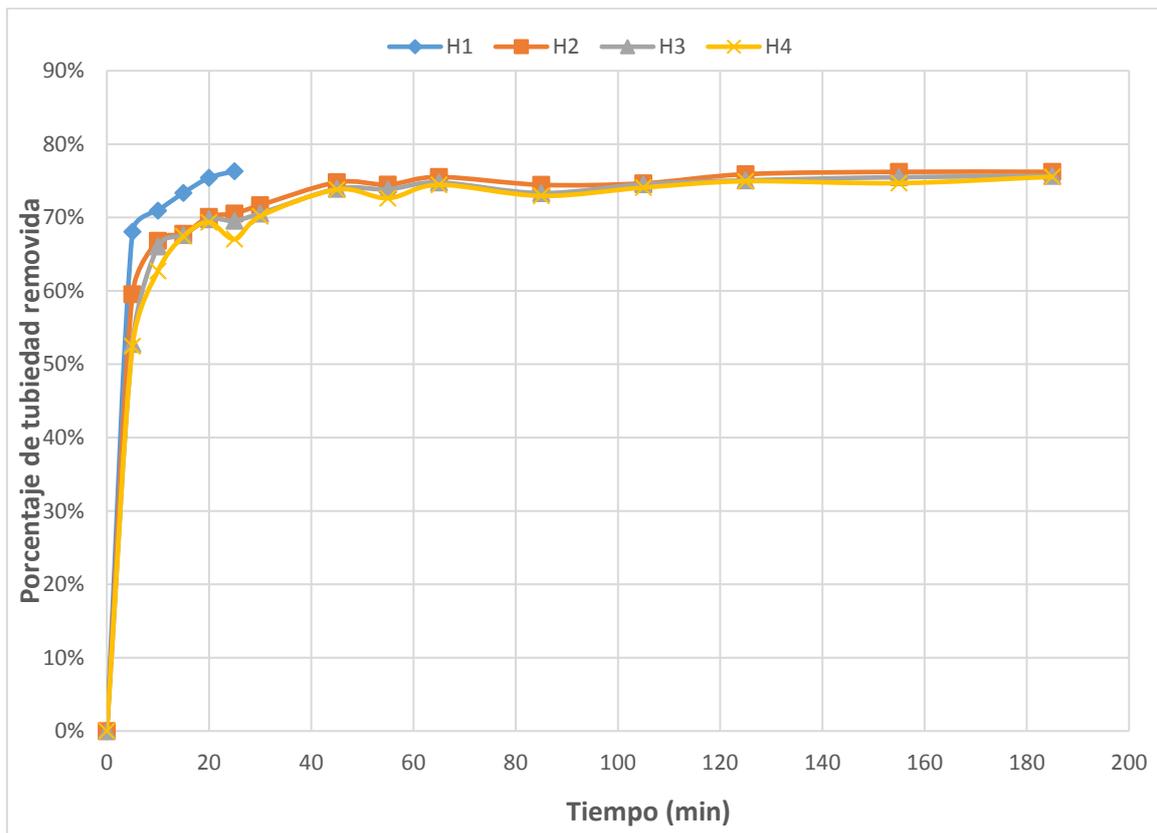


Figura 9. Tiempo vs Porcentaje de turbiedad removida. Alturas H1=13 cm; H2= 58 cm; H3= 103 cm; H4=148 cm, valores tomados desde la base de la columna hasta la línea del agua tratada la cual permaneció después del último muestreo.

Tabla 9

Tiempo de remoción del sistema de partículas

Altura (cm)	% Turbiedad removida							Tiempo (min)
	A	B	C	D	E	F	G	
	10	20	30	40	50	60	70	
13	0,7	1,4	1,9	2,6	3,3	4,1	5,3	
58	0,8	1,5	2,3	3,1	3,9	5,1	20	
103	0,9	1,75	2,6	3,5	4,6	6,6	20	
148	0,9	1,75	2,6	3,5	4,6	7,2	30	

Nota: Se asignaron letras a los porcentajes de remoción obtenidos en función al nivel alcanzado del agua tratada.

4.2.2.4. Cálculo de la velocidad de sedimentación

Tabla 10

Velocidad de sedimentación

Fórmula	Símbolo	Unidad	Valor	
$V = \frac{d}{t}$	V_s	m/s	A	0,0274
			B	0,0141
			C	0,0095
			D	0,0070
			E	0,0054
			F	0,0034
			G	0,0008

Nota: Se determinaron distintas velocidades de sedimentación en función al porcentaje de remoción de sólidos suspendido para establecer el valor idóneo de diseño.

4.2.2.5. Cálculo de remoción de partículas floculentas

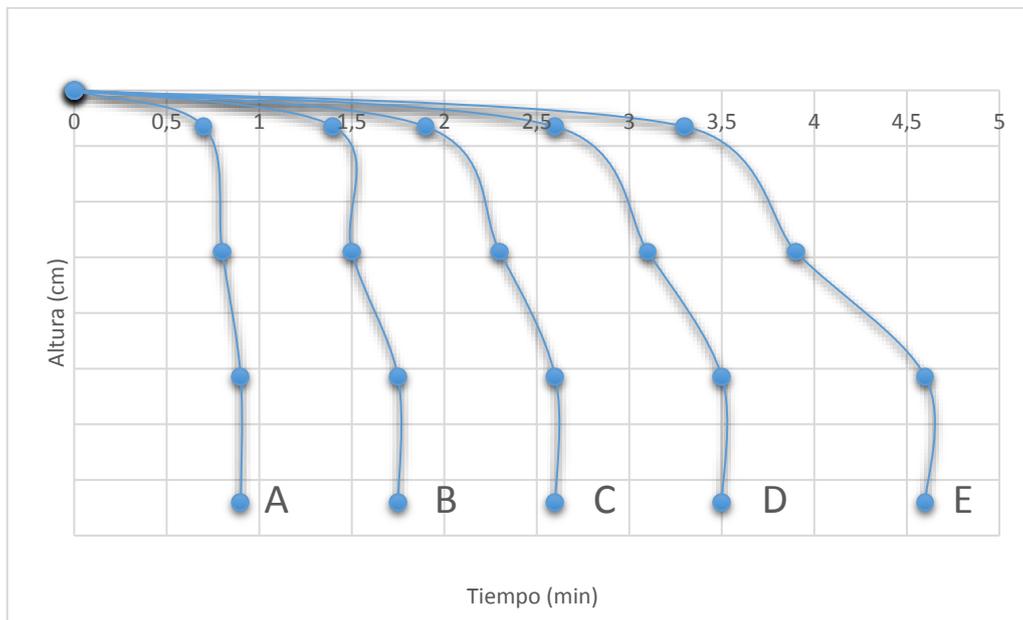


Figura 10. Curvas de isoremovición, para la remoción de partículas floculentas en función al porcentaje de turbiedad de los 5 primeros niveles.

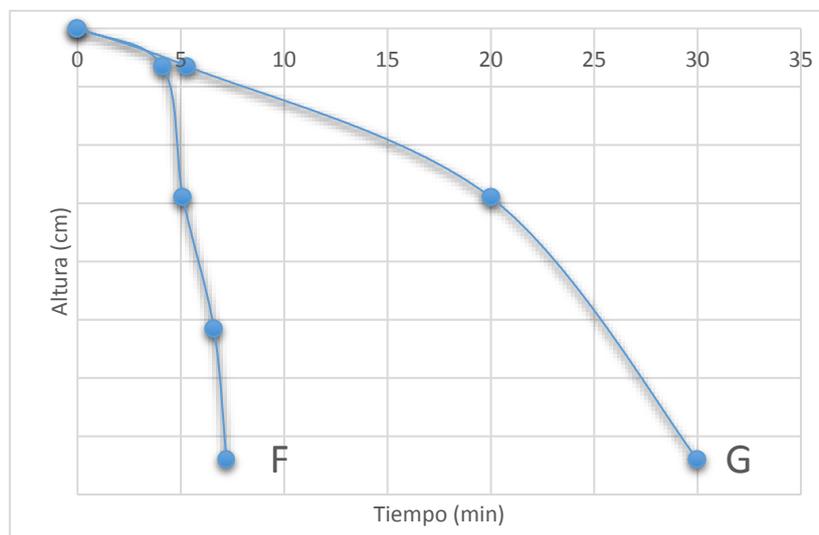


Figura 11. Curvas de isoremovición, para la remoción de partículas floculentas en función al porcentaje de turbiedad de los 2 últimos niveles

En la figura 5 y 6, se determinó el valor de profundidad correspondiente a cada nivel, aplicando la ecuación 6 se calculó el porcentaje de remoción del sistema.

Tabla 11

Porcentaje de remoción para cada curva con su respectivo nivel

Promedio de alturas (cm)		%Remoción		Velocidad de sedimentación (m/s)
hB	0,041	RA	31%	0,0274
hC	0,182	RB	41%	0,0141
hD, hD'	0,047; 0,324	RC	49%	0,0095
hE, hE'	0,061; 0,392	RD	55%	0,0070
hG, hG'	0,074; 0,561	RE	61%	0,0054
hF	0,419	RF	66%	0,0034

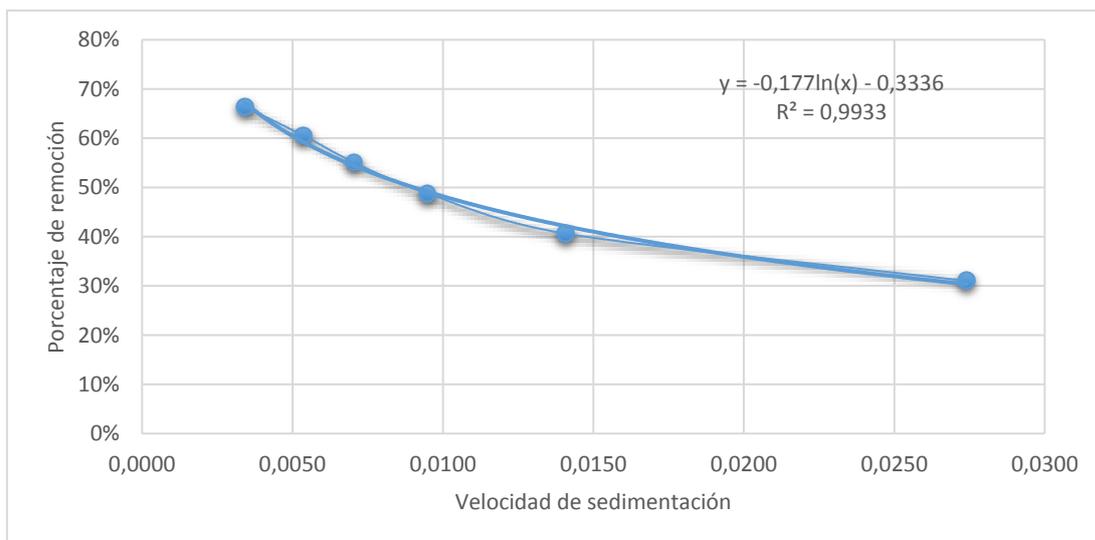


Figura 12. Velocidad de sedimentación vs porcentaje de remoción de las partículas floculentas

4.3. Velocidad del fluido

Tabla 12

Cálculo de la velocidad del fluido

Fórmula	Símbolo	Unidad	Valor
---------	---------	--------	-------

$V_{f\theta} = \frac{Q}{N \times d \times w}$	$V_{f\theta}$	m/s	0,00514
---	---------------	-----	---------

Aplicando la ecuación 2 para un ángulo de inclinación de 65° se determinó que las velocidades de sedimentación previamente calculadas son mayores para los niveles de remoción A, B, C, D, E, F, por tanto, mientras el fluido atraviesa la superficie se podrán sedimentar los flóculos.

4.3.1. Construcción

4.3.1.4. Tolva

Se ensambló con cuatro piezas, 2 unidades de forma triangular con dimensiones de base 0,618 m; la longitud de sus lados es de 0,437 m. Por otro lado, las 2 unidades restantes poseen una base de 0,482 m y sus lados poseen una longitud de 0,44 m. Las cuatro unidades adquieren la forma de un triángulo isósceles.

Con cada unidad se procedió a formar una pirámide rectangular, asegurado cada lado con tornillos para que la misma obtenga la mayor resistencia, ya que, es donde se concentra el mayor peso del tanque como se muestra en la figura 10.

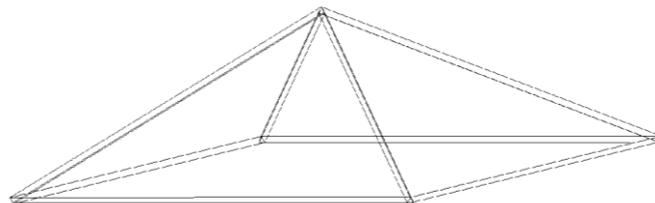


Figura 13. Vista de la construcción de la pirámide cuadrangular o tolva.

4.3.1.5. Cuerpo del sedimentador

A continuación, se muestran los lados del tanque con las dimensiones finales. Se construyó con piezas de diferentes dimensiones como se muestra en la tabla 13.

Tabla 13

Dimensionamiento de las piezas del cuerpo del sedimentador

Lado A y B	Lado C	Lado D	Accesorios

Nota: Las unidades de dimensión de las piezas está en centímetros.

A continuación, se muestra el resultado de la construcción del cuerpo del sedimentador de tipo Lamellar

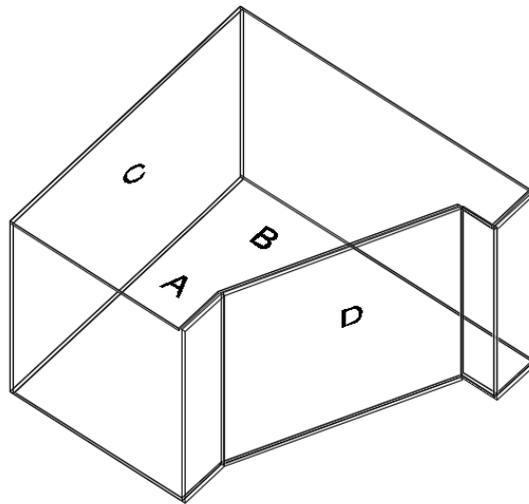


Figura 14. Vista de la construcción del cuerpo del tanque sedimentador

4.4. Modelo didáctico



Figura 15. Vista lateral de resultado final del modelo didáctico construido

4.5. Costo de construcción

Tabla 14

Análisis de los precios unitarios de la construcción del tanque sedimentador

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
RUBRO:	TANQUE SEDIMENTADOR DE 0,46 M3			UNIDAD:	Unidad
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	$C=A*B$	R	$D=C*R$

Herramienta menor 5 % (N)	1,00	33,00	33,00	4,50	15,98
Cortadora láser	0,00		0,00		148,50
SUBTOTAL M					164,48
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN (CATEG)	CANTIDAD	JORNAL/HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Hojalatero	1,00	3,55	3,55	30,00	106,50
Ayudante	3,00	3,55	10,65	20,00	213,00
SUBTOTAL N					319,50
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	COSTO	
		A	B	C=A*B	
Plancha acrílica 1,80x1,20 espesor 9mm	Unidad	3,00	270,00	810,00	
Pega acrílica	Litros	1,00	150,00	150,00	
Tornillos	Unidad	66,00	0,10	6,60	
Base estructura metálica (incluye montaje)	unidad	1,00	200,00	200,00	
Llaves de paso 3/4"	unidad	1,00	25,00	25,00	
Teflón	unidad	1,00	2,00	2,00	
Accesorios de PVC	Unidad	4,00	1,50	6,00	
SUBTOTAL O					1.199,60
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C=A*B	
Transporte	Global	1,00	100,00	100,00	
SUBTOTAL P					100,00
COSTO TOTAL (M+N+O+P)					1.783,58

4.6. Ensayo en la unidad de tratamiento

a) Cálculo de dosis óptima

Tabla 15

Resultado del proceso de coagulación floculación

NIVEL	1	2	3	4	5	6
DOSIS (uL/L)	50	60	70	80	90	100
TURBIEDAD (NTU)	23,3	22,9	19,7	16,4	9,6	16,8

Nota: Los ensayos efectuados se evidencia en el anexo 4.

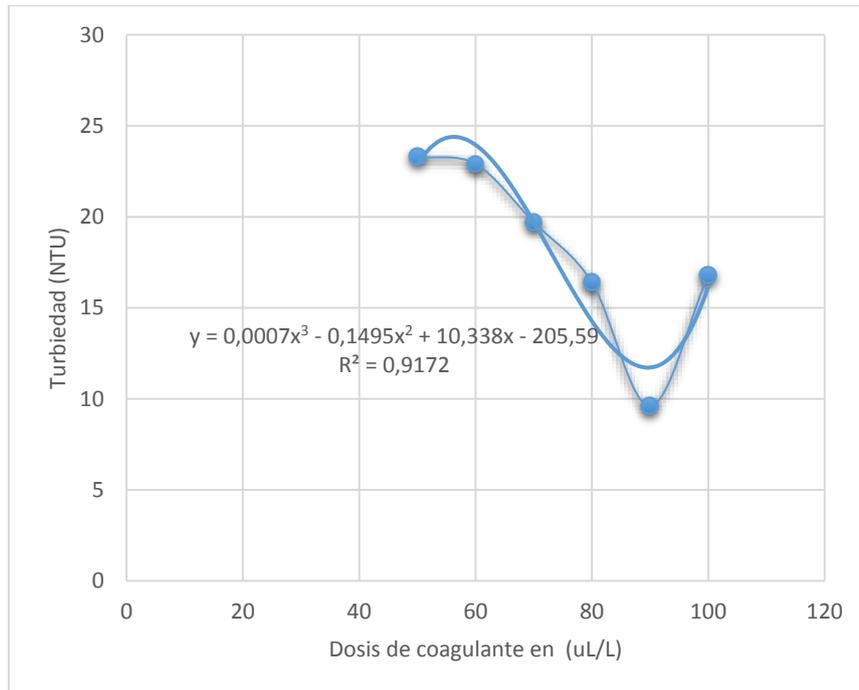


Figura 16. Comportamiento del valor de turbiedad determinado en función a la dosis aplicada de coagulante.

Se evidenció el valor de dosis óptima de 90 uL/L fue el idóneo, dado que, la mayoría de las partículas fueron removidas, tomando en consideración la figura 13 el punto de inflexión está dado en el nivel 5.

b) Ensayo en la unidad de tratamiento

Efectuadas las conexiones, se pudo evidenciar el funcionamiento idóneo en el tanque sedimentador de tipo lamellar dado que los flóculos formados en el proceso de coagulación – floculación, sedimentaron en la unidad construida, lo que denota que la velocidad de sedimentación es mayor a la velocidad del fluido, adicionalmente, se evidenció que los flóculos incrementan su tamaño conforme avanza el proceso de sedimentación al chocar con otras partículas de menor o igual tamaño. Evidenciándose que se trata de una sedimentación tipo II.

Conforme avanzó el tiempo del proceso, la sedimentación se fue llevando a cabo progresivamente en cada una de las zonas de la unidad piloto, siendo este uno de los objetivos de este tipo de equipos, lo que incrementa la eficiencia en la remoción.

En la zona de entrada, las partículas se encontraron totalmente suspendidas, en cambio, en la zona de las placas (zona de sedimentación del equipo) las partículas disminuyeron su movilidad con la velocidad del fluido, permitiendo que el proceso de sedimentación se efectuara de forma simultánea. En tanto a la tolva, no se evidenció un mayor movimiento de influencia por la corriente de agua que resulte en una re - suspensión de las partículas.

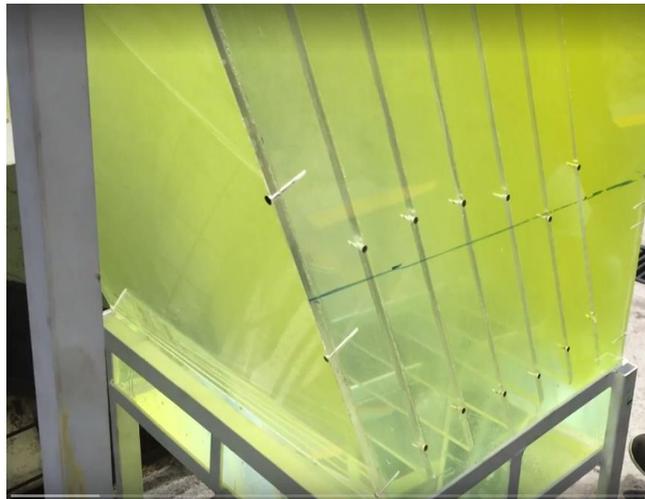


Figura 17. Ingreso de agua residual sintética a la unidad de tratamiento



Figura 18. Como señala el círculo se puede evidenciar los flocúlos sedimentados en la tolva.

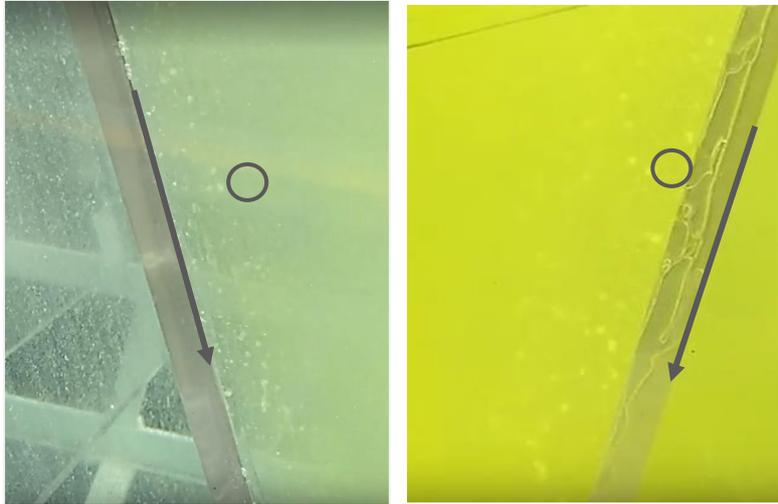


Figura 19. Flóculos sedimentables en la zona de placas.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

El modelo didáctico fue construido con un material sumamente resistente con un espesor de 9 mm, por lo cual es considerado una alta resistencia, con un tiempo de vida extenso. El sedimentador soporta un volumen de 0,46 m³. A su vez, puede ser usado como una herramienta que permita el entendimiento del proceso de sedimentación. En tanto a base que sostiene el modelo, fue reforzada con una estructura metálica, puesto que la parte inferior se concentra la mayor fuerza, debido a la acumulación de lodos.

En tanto al análisis de los precios unitarios estimados para la construcción del tanque sedimentador de tipo lamellar dio como resultado un total de 1,783.58 USD, contemplando el uso de equipos, mano de obra, materiales y transporte que permitieron efectuar la construcción del diseño de la unidad de tratamiento desarrollado con normas de construcción aplicables.

Los ensayos realizados en la columna de sedimentación para determinar la turbiedad del agua residual indican que existe una mayor concentración en ese punto o altura a la cual se hizo la muestra, por consiguiente, podemos concluir que a una mayor concentración de partículas habrá una mayor velocidad de sedimentación.

La velocidad del fluido debe ser menor a la velocidad de sedimentación, en tanto a los valores determinados como se muestran en la tabla 9, esto si se cumple hasta el porcentaje de remoción del 61%. Dicho esto, la unidad puede efectuar el tratamiento de forma exitosa dado los parámetros planteados, respondiendo a la eficiencia del diseño hidráulico establecido

El ensayo realizado en la unidad de tratamiento fue exitoso debido a que las partículas floculentas sedimentaron, las mismas que se deslizaron por las placas permitiendo que el agua tratada saliera por la parte superior, evidenciándose de esta forma el proceso efectuado de sedimentación de tipo II.

5.2. Recomendaciones

Se propone evaluar las diferentes modificaciones que se puedan realizar a la entrada del caudal en la unidad de tratamiento, y de esta forma poder considerar las diferentes variables que pueden influir en el funcionamiento.

En diseños posteriores, se deberá tomar en cuenta que los cortes angulares de las placas producen cierta turbulencia, por lo que será necesario estudiar algún tipo de esmerilado que suavice el ángulo recto de la placa.

Estudiar los diferentes tipos de sedimentación que pueden suceder dentro de la unidad de tratamiento.

REFERENCIAS

- Abbassi, B., & Baz, I. (2008). *Integrated Wastewater Management: A Review. In Efficient Management of Wastewater*. (2.^a ed). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Anjum, M., Al-Makishah, N., & Barakat, M. (2016). Principles and Applications of Environmental Biotechnology for a Sustainable Future. Recuperado el 4 de enero del 2018 de <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2016.05.022>
- Asthana, M., Kumar, A., & Sharma, B. (2017). *Wastewater Treatment. In Principles and Applications of Environmental Biotechnology for a Sustainable Future*. Singapore: Springer Singapore.
- Ayeche, R. (2012). Treatment by coagulation-flocculation of dairy wastewater with the residual lime of National Algerian Industrial Gases Company (NIGC-Annaba). Recuperado el 15 de agosto de 2017 de <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.026>
- Bahadori, A., & Smith, S. (2016). *Dictionary of Environmental Engineering and Wastewater Treatment*. (1.^a ed). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg..
- Brandt, M., Johnson, K., Elphinston, A., Ratnayaka, D., Brandt, M., Johnson, K., Ratnayaka, D. (2017). *Chemical Storage, Dosing and Control. In Twort's Water Supply*. Recuperado el 3 de abril de 2018 de <https://10.1057/9781137467140>.
- Bringezu, S. (2018). Key Strategies to Achieve the SDGs and Consequences for Monitoring Resource Use. In *Managing Water, Soil and Waste Resources to Achieve Sustainable Development Goals*. Recuperado el 29 de marzo de 2018 de https://doi.org/10.1007/978-3-319-75163-4_2.
- Camp, T. (1946). *Sedimentation and the Design of Settling Tanks*. Transactions of the American Society of Civil Engineers. Recuperado el 15 de abril

de <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784408148>.

- Cheremisinoff, N. P. (2002). Sedimentation, Clarification, Flotation, and Coalescence. *In Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies*. Recuperado el 18 de mayo de 2018 de <https://doi.org/10.1016/B978-075067498-0/50011-5>
- Choumane, F. Z., Benguella, B., Maachou, B., & Saadi, N. (2017). Valorisation of a bioflocculant and hydroxyapatites as coagulation-flocculation adjuvants in wastewater treatment of the steppe in the wilaya of Saida (Algeria). *Ecological Engineering*. Recuperado el 25 de octubre del 2017 de <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.07.013>
- Crittenden, J., Trussell, R., Hand, D., Howe, K., & Tchbanoglous, G. (2012). *MWH' Water Treatment Principles and Design* (3.^a ed). New Jersey. WhJhon Wiley & Sons Inc.
- Davidson, J., & Summerfelt, S. (2005). Solids removal from a coldwater recirculating system—comparison of a swirl separator and a radial-flow settler. *Aquacultural Engineering*. Recuperado el 03 de noviembre de 2017 de <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.11.002>
- De, A. (2017). *Sedimentation Process and Design of Settling Systems*. (2.^a ed.). New Delhi: Springer India.
- Food and Agriculture Organization (2013). Water resource information by country/territory and MDG Water Indicator. Recuperado el 19 de marzo de 2018 de http://www.fao.org/nr/water/aquastat/maps/AQUASTAT_water_resources_and_MDG_water_indicator_March_2013.pdf
- Jones, D. L., Freeman, C., & Sánchez, A. (2017). Waste Water Treatment. Recuperado el 2 de enero del 2018 de [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(18\)30294-5](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(18)30294-5)
- Malato, S., Oller, I., Fernández-Ibáñez, P., & Fuerhacker, M. (2010). Technologies for Advanced Wastewater Treatment in the

Mediterranean Region. *Springer, Berlin, Heidelberg*. Recuperado el 12 de agosto de 2018 de https://doi.org/10.1007/698_2010_59

Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater engineering: collection, treatment, disposal*. (5.^a ed.). McGraw-Hill.

Ochowiak, M., Matuszak, M., Włodarczak, S., Ancukiewicz, M., & Krupińska, A. (2017). The modified swirl sedimentation tanks for water purification. *Journal of Environmental Management*, 189, 22–28. Recuperado el 04 de abril de <https://www-sciencedirect-com.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/science/article/pii/S0301479716310027#bbib6>

Robescu, D., Mandiș, C., & Robescu, D. (2010). Design Lamellar Secondary Settling Tank Using Numerical Modeling. Recuperado el 23 de febrero de https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rez799.pdf

Romero, J. (2002). *Potabilizacion Del Agua*. (3.^a ed.). Bogotá, Colombia. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Scholz, M. (2016). *Coagulation and Flocculation. In Wetlands for Water Pollution Control*. (2.^a ed.). Salford, UK: Elsevier.

Simate, G. (2015). The treatment of brewery wastewater for reuse by integration of coagulation/flocculation and sedimentation with carbon nanotubes 'sandwiched' in a granular filter bed. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 1277–1285. Recuperado el 21 de julio de 2018 de [m https://www-sciencedirect-com.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/science/article/pii/S1226086X14002949](https://www-sciencedirect-com.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/science/article/pii/S1226086X14002949)

Tondera, K., Blecken, G., Chazarenc, F., Lucke, T., & Tanner, C. (2018). *Treatment Techniques for Variable Flows*. Berlin, Springer Cham.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (2017a). *The United Nations World Water Development Report 2017 The Untapped Resource Wastewater World Water Assessment Programme United*

Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Recuperado el 21 de febrero de 2018 de <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002475/247553e.pdf>.

Xue, M., Gao, B., Li, R., & Sun, J. (2018). Aluminum formate (AF): Synthesis, characterization and application in dye wastewater treatment. *Journal of Environmental Sciences*. Recuperado el 23 de noviembre de 2017 de <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.02.013>.

Yao, K. (1970). Theoretical Study of High-Rate Sedimentation. *Journal of the Water Pollution Control Federation*. Recuperado el 12 de enero de 2018 de <https://www.jstor.org/stable/25036470?seq=1/subjects>.

ANEXOS

Anexo 1

Ensayo en el test de jarras con agua residual de tipo industrial.



Anexo 2

Proceso de tratamiento de floculación-coagulación



Anexo 3

Resultado del agua de tipo industrial tratada en el test de jarras



Anexo 4

Ensayo en la columna de sedimentación



Anexo 5

Sedimentación de partículas floculentas



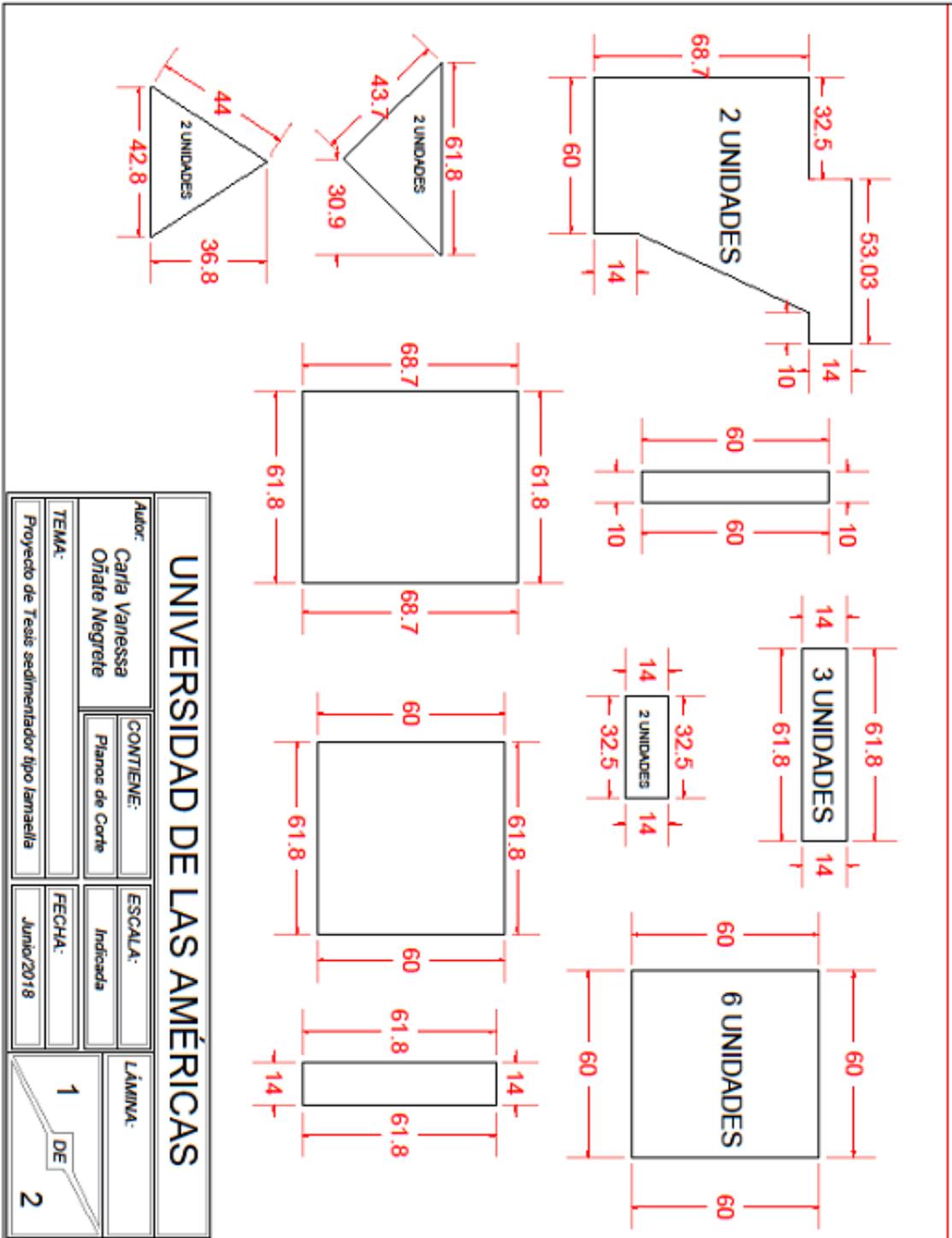
Anexo 6

Toma de muestras en uno de los grifos de la columna de sedimentación



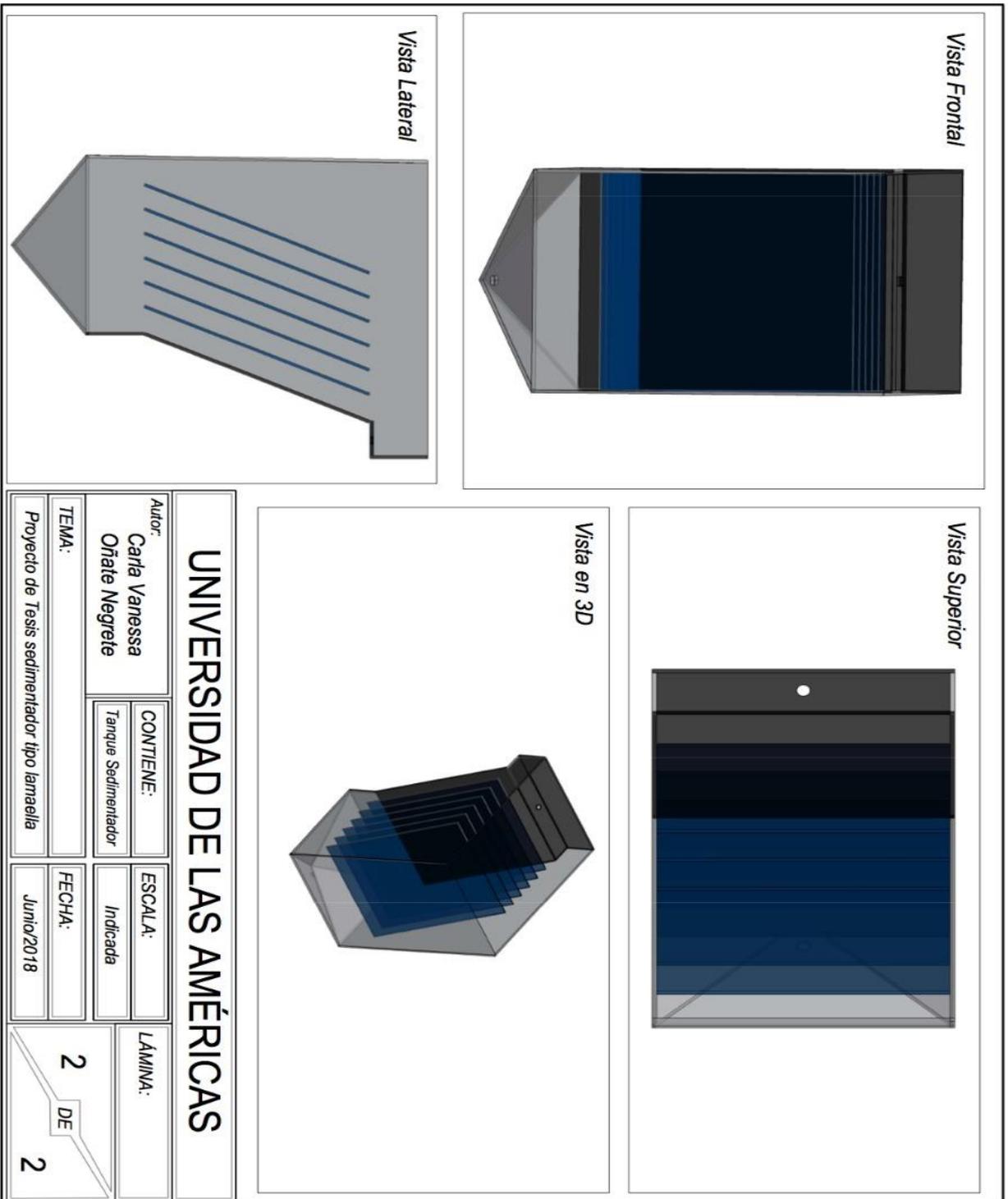
Anexo 7

Planos de corte



Anexo 8

Vistas del Tanque sedimentador



Anexo 9

Modelo didáctico construido



Anexo 10

Vista lateral del modelo didáctico construido



Anexo 11

Vista lateral del modelo didáctico



Anexo 12

Vista superior del modelo didáctico



Anexo 13

Ensayo en el test de jarras del agua residual sintética



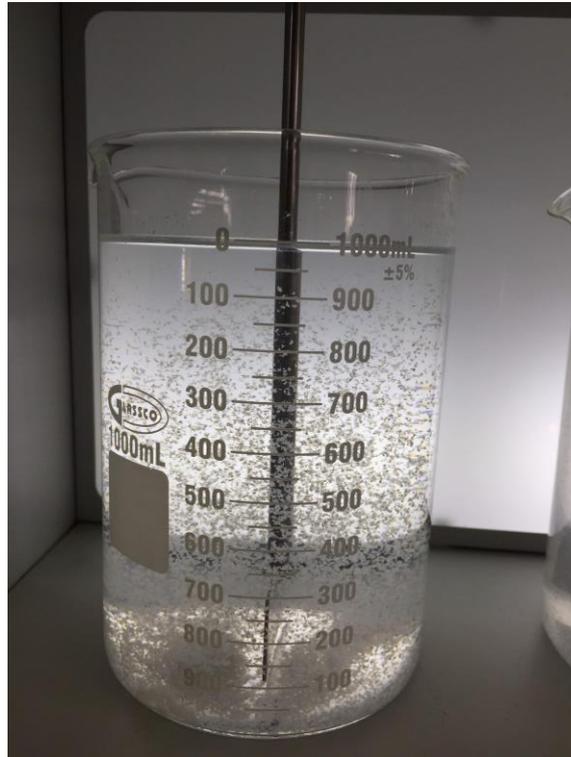
Anexo 14

Tratamiento del agua residual sintética



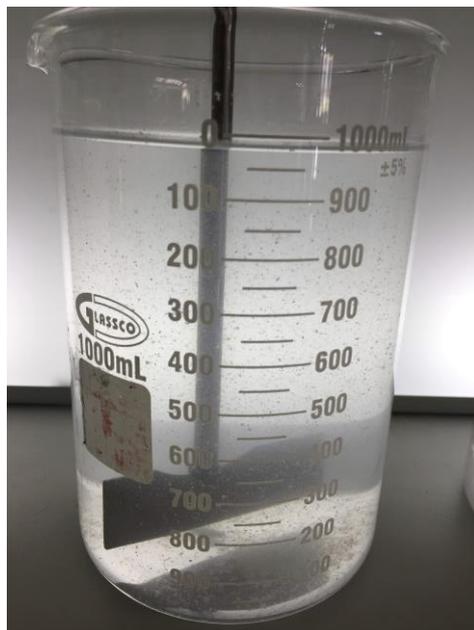
Anexo 15

Sedimentación de flóculos en el agua residual sintética



Anexo 16

Agua residual sintética tratada



Anexo 17

Cálculos

Velocidad final

Placas inclinadas cuadradas				Contracorriente	Co-corriente	Flujo cruzado								
	Valor	Unidad												
largo	2,0	m	Lp											
espacio entre placas	0,05	m	d											
ángulo de inclinación	0	80	°											
Placas inclinadas cuadradas														
largo	0,7	m	Lp	0,009										
espacio entre placas	0,06	m	d	0,0635										
Número de canales	6		N											
Ancho del canal	0,300	m	w											
Área de la sección transversal	0,49	m ²												
Velocidad de estabilización	0,001	m/s												
Velocidad del fluido en el canal	0,006	m/s	vfe											
				0	10	20	30	40	50	60	70	80		
Contracorriente				Vs	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,149268	0,2	0,3	
Co-corriente				Vs	0,00053	0,00053	0,00055	0,00058	0,00064	0,00075	0,00092	0,00125	0,00205	
Placas inclinadas cuadradas														
largo	0,60	m	Lp											
espacio entre placas	0,06	m	d											
Número de canales	6		N											
Ancho del canal	0,3600	m	w											
Área de la sección transversal	0,36	m ²												
Velocidad de estabilización	0,002	m/s												
Velocidad del fluido en el canal	0,005	m/s	vfe											
				0	10	20	30	40	50	60	65	70	80	
Contracorriente				Vs	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,4
Co-corriente				Vs	0,000514	0,000522	0,000528	0,000562	0,00062	0,000715	0,000877	0,001002	0,00118	0,00189

Anexo 18

Columna de sedimentación

Intervalo	Tiempo (min)	Muestra				Altura (cm)
		1	2	3	4	
5	0	314,2	352,2	355,7	360,5	193
	5	110,4	139,9	163,3	164,3	189
	10	100,5	114,7	117,3	128,9	186,5
	15	92,1	111,4	112,0	112,5	185,5
	20	85,0	103,4	104,5	106,0	184,5
	25	81,9	101,8	105,2	113,9	183,5
	30		97,9	101,8	103,1	182,5
10	40		87,1	90,2	90,5	180,5
	50		88,2	90,4	94,6	179,7
	60		84,6	87,2	88,3	179,2
20	80		88,3	92,2	93,5	178,7
	100		87,6	88,0	89,6	178,2
	120		83,3	86,2	86,6	177,7
	150		82,2	84,7	87,5	177,2
30	180		82,2	84,1	84,5	176,7

Anexo 19

Porcentaje de turbiedad removida

Altura (cm)	% Turbiedad removida							Tiempo (min)
	10	20	30	40	50	60	70	
13	0,7	1,4	1,9	2,6	3,3	4,1	5,3	20
58	0,8	1,5	2,3	3,1	3,9	5,1	20	
103	0,9	1,75	2,6	3,5	4,6	6,6	20	
148	0,9	1,75	2,6	3,5	4,6	7,2	30	

