

**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK**

**FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES**

**Trabajo de Fin de Carrera Titulado:**

“Determinación de los coeficientes de sedimentación de los lodos para la Planta de tratamiento de Aguas Residuales de Vindobona”

**Realizado por:**

**JAIME GUSTAVO MENDOZA OLMEDO**

**Director del proyecto:**

**Miguel Martínez- Fresneda Mestre , PhD.**

**Como requisito para la obtención del título de:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**AÑO**

**Quito, 06 de agosto de 2015**

I.	INTRODUCCIÓN .....	10
1.1.	Descripción del Tema .....	10
1.2.	Antecedentes.....	12
1.3.	IMPORTANCIA .....	16
1.4.	OBJETIVOS.....	17
1.4.1.	Objetivo general.....	17
1.4.2.	Objetivos específicos .....	17
1.5.	DESCRIPCIÓN DEL LUGAR.....	17
1.5.1.	Ubicación de la Planta Piloto de Tratamiento de Agua Residual.....	17
1.5.2.	Operación de la Planta Piloto de Tratamiento de Agua Residual.....	18
1.5.3.	Descripción de las Fases operación en la Planta Piloto.....	21
II.	MARCO TEÓRICO .....	25
2.1.	MARCO LEGAL.....	32
2.2.	MARCO CONCEPTUAL .....	40
2.2.1.	Sedimentación.....	40
2.2.2.	Lodos Activados.....	42
2.2.2.1.	Relación alimento / microorganismos (F/M) .....	42
2.2.2.2.	Tiempo de retención celular .....	43
III.	METODOLOGÍA.....	45
3.1.	Población y muestra.....	45
3.2.	Laboratorio .....	46
3.3.	Procesamiento de datos.....	46
3.4.	Equipos .....	47
3.5.	Procedimiento de estudio de sedimentación en columna.....	47
3.5.1.	Análisis de la sedimentación zonal.....	47
3.5.2.	Determinación de las constantes de sedimentación zonal .....	48
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	49
4.1.	Estudio de sedimentación en la Planta Piloto de Tratamiento de Agua Residual en la descarga del Batán .....	49
4.1.1.	Relación alimento - microorganismos (F/M).....	49

4.1.1.1.	Fase 1 y Fase 2.....	49
4.1.1.2.	Fase 3.....	51
4.1.2.	Tiempo de retención celular .....	52
4.1.2.1.	Fase 1, 2 y 3.....	52
4.2.	Pruebas de sedimentación a diferentes concentraciones en la Planta Piloto de tratamiento de aguas residuales.....	54
4.2.1.	Fase 1 y 2.....	54
4.2.2.	Fase 3.....	56
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	70
5.1.	Conclusiones .....	70
5.2.	Recomendaciones .....	71
VI.	BIBLIOGRAFÍA:.....	73
VII.	ANEXOS.....	75

Tabla 1: Límites de Efluente de Fases de Planta Piloto .....	19
Tabla 2: Características Físicas de los Tanques Componentes de la Planta Piloto.....	19
Tabla 3: Criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces, marinas y de estuarios .....	35
Tabla 4 Criterios de calidad admisible del amoníaco total para la protección de la vida acuática (mg/LNH <sub>3</sub> ) .....	37
Tabla 5 Criterios de calidad admisible de la DBO <sub>5</sub> para la protección de la vida acuática.	38
Tabla 6: Límites máximos permitidos por cuerpo receptor. ....	38
Tabla 7: Tipos de sedimentación y su descripción .....	40
Tabla 8: Datos obtenidos de los ensayos en la columna de sedimentación .....	58
Tabla 9: Velocidad de sedimentación zonal correspondiente a la concentración de SST de cada prueba .....	67
Tabla 10: Cálculos correspondientes, utilizando las concentraciones y la VSZ de cada prueba .....	67

Figura 1: Ubicación de la Planta Piloto .....	18
Figura 2: Fase 1, Configuración Esquemática Remoción de DBO/DQO .....	22
Figura 3: Fase 2, Configuración Esquemática Nitrificación .....	23
Figura 4: Fase 3, Configuración Esquemática Nitrificación / Desnitrificación .....	24
Figura 5: Relación F/M de la Fase 1 de la Planta Piloto .....	50
Figura 6: Relación F/M de la Fase 2 de la Planta Piloto .....	50
Figura 7: Relación F/M de la Fase 3 de la Planta Piloto .....	51
Figura 8: Tiempo de retención celular de todas las fases de la Planta Piloto .....	53
Figura 9, Figura 10 y Figura 11: Levantamiento de lodos. ....	54
Figura 12 y Figura 13: Bacterias filamentosas observadas bajo el microscopio .....	56
Figura 14: Curvas de sedimentación, altura (h) de la interfase (cm) en función del tiempo (min) .....	60
Figura 15: Estudio de las curvas de sedimentación con velocidades similares pero con diferentes concentraciones de SST, primer ejemplo .....	61
Figura 16: Estudio de las curvas de sedimentación con velocidades similares pero con diferente concentración de SST, segundo ejemplo .....	62
Figura 17: Estudio de curvas de sedimentación con presencia de desnitrificación .....	63
Figura 18: Estudio de curvas de sedimentación con altas concentraciones de SST .....	64
Figura 19: Curvas de sedimentación seleccionadas .....	65
Figura 20: Velocidad de sedimentación zonal.....	66
Figura 21: Velocidad de sedimentación (ln (cm/min)) en función de la concentración de SST (g/l).....	68

## **Agradecimientos**

A la Universidad Internacional SEK y a la Facultad de Ciencias Ambientales, por la formación académica recibida durante los años de estudiante.

A la Asociación Hazen & Sawyer – Pi épsilon, por permitirme realizar esta investigación, a todo el personal por el apoyo constante, logístico y técnico. Especialmente al consultor Dr. PhD Fabián Yáñez por la colaboración y el aporte de sus conocimientos en la realización de esta investigación.

Jaime Mendoza.

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a toda mi familia, especialmente a mis padres Jaime Mendoza y María de los Ángeles Olmedo. A mis abuelos Hortencia y Gustavo. A mi tío Gustavo Venegas. Quienes fueron un pilar fundamental en mi desarrollo académico y personal.

Jaime Mendoza.

## Resumen

Se presenta la determinación de los coeficientes de sedimentación de los lodos para la Planta de tratamiento de Aguas Residuales de Vindobona. El estudio se llevó a cabo en la Planta Piloto de tratamiento de Agua residual, ubicada en Quito, Ecuador. Esta planta piloto operó en tres Fases, con diferentes tiempos de retención celular. Los objetivos principales fueron realizar un estudio de la sedimentación a lo largo del funcionamiento de la planta piloto y determinar los coeficientes de velocidad de sedimentación a través del modelo de Vesilind. En el estudio de la sedimentación en la Fase 1 y 2, presentó el fenómeno de “bulking” o levantamiento de lodos, el cual estuvo relacionado con problemas de tiempo de retención celular bajo, mala relación alimento – microorganismo, desnitrificación y bacterias filamentosas. Para la Fase 3 la sedimentación fue buena y se logró determinar los coeficientes de velocidad de sedimentación del modelo de Vesilind fueron  $V_0 = 6,24 \text{ m/h}$  y  $k = 1,29$ . Estos datos son básicos para la modelación de la Planta de tratamiento de Aguas Residuales de Vindobona y así poder anticipar su comportamiento bajo diferentes condiciones de operación.

## Palabras clave

Sedimentación, lodos activados, levantamiento de lodos, Vesilind.

## Abstract

In this study is presented the determination of sludge settling coefficients for Vindobona's Activated Sludge Wastewater Treatment Plant. The investigation was carried out in the Wastewater Pilot Plant, located in Quito, Ecuador. The Pilot Plant operated in three Phases, with different sludge retention times. The main objectives were to conduct a study of the settling along the operation of the pilot plant and determine the coefficients of sedimentation rate through Vesilind model. In the study of the settling in phase 1 and 2, presented the phenomenon of bulking, which was related with problems of low sludge retention time, bad relationship food - microorganism, denitrification and filamentous bacteria. In phase 3 sedimentation was better and it was possible to determine the coefficients of sedimentation velocity model Vesilind were  $V_0 = 6,24\text{m / h}$  and  $k = 1.29$ . These data are essential for modeling Vindobona's Activated Sludge Wastewater Treatment Plant so it could anticipate their behavior under different operating conditions.

## Keywords

Settling, activated sludge, bulking, Vesilind.

## I. INTRODUCCIÓN

Vivimos en una sociedad de constante crecimiento urbano e industrial, lo que cada día conlleva a una mayor demanda de recursos y mayores impactos al ambiente. Un recurso fundamental para el desarrollo y la expansión de las sociedades es el agua, ya que esta es empleada tanto en la vida cotidiana, como en la gran mayoría de los procesos industriales.

Después de que el agua ha sido usada en los hogares o la industria, de forma adecuada o inadecuada, esta tiene que ser desechada, y generalmente es eliminada sin ningún tipo de tratamiento al ambiente. Esto constituye una fuente de contaminación gigantesca y constante, la cual no solo puede generar problemas ambientales, sino también problemas en la salud de las poblaciones.

En necesidad o en consecuencia, de estas malas prácticas, es que se busca mitigar estos impactos a través de las plantas de tratamiento de agua, con el fin de conservar los ecosistemas y la salud de la población.

### 1.1.Descripción del Tema

Las aguas residuales son desechos líquidos provenientes de residencias e industrias, que contienen microorganismos, material disuelto y en suspensión. Generalmente estas aguas, son conducidas a través de las ciudades por un sistema de alcantarillado, el cual se encargará de depositar dichas aguas en un ente receptor, con o sin un tratamiento previo (Báez, 2007).

El tratamiento de las aguas residuales, requiere un conjunto de operaciones unitarias, las cuales permitirán remover y reducir todos los compuestos no deseados existentes en la misma, que a su vez representan un peligro para la salud y el medio ambiente. Dentro de estas operaciones unitarias se encuentra la sedimentación, la cual es fundamental en el proceso de lodos activados.

Para llevar a cabo esta investigación, se implementaron criterios de sedimentación por zonas, los cuales son adecuados para concentraciones de sólidos excedentes de 500 mg/L (Ramalho, 2003). Las pruebas se realizaron en una columna de sedimentación de 1.685m de alto y 6 pulgadas de diámetro.

Donde, según Ramalho, en su libro de Tratamiento de Aguas Residuales, 2003:

Los lodos comienzan a precipitarse estableciéndose una interfase, ente la superficie de la capa de sólidos que están sedimentándose y el líquido clarificado que se presenta en la parte superior. La zona inferior del líquido clarificado es lo que se denomina zona interfacial, la concentración de lodos en esta zona es uniforme, precipitándose todo ello como una capa de materia a una velocidad constante. Simultáneamente a la formación de la interfase y de la zona interfacial, empieza una compactación de los sólidos en suspensión en el fondo del cilindro. En esta zona la concentración de sólidos en suspensión es también uniforme, y la interfase que bordea esta zona avanza en el cilindro con una velocidad constante.

Estas pruebas de sedimentación de zona fueron realizadas, al igual que el análisis de sólidos suspendidos totales, en la Planta Piloto de Tratamiento de Agua residual, para obtener los datos necesarios para el cálculo y la determinación de los coeficientes de sedimentación.

Para este cálculo se empleó el modelo matemático, de Velocidad de Sedimentación de Zona, el cual se refiere a la velocidad de sedimentación de lodos a concentraciones relativamente altas, en donde las partículas sedimentan como una unidad independiente del tamaño de ella. Esta velocidad será medida en una prueba Batch en la cual se mide directamente la velocidad de la interfase del lodo. Este modelo empleará la ecuación exponencial de Vasilind, con lo que se obtendrá las curvas de profundidad de la interfase versus tiempo (Hazen and Sawyer, 2014).

## 1.2. Antecedentes

Los seres humanos han almacenado y distribuido el agua durante siglos, es así que en Jericó (Israel), hace 7000 años el agua era reservada en pozos y distribuida por canales sencillos, que no eran más que simples excavaciones en la arena o en las rocas. Posteriormente en la antigua Grecia, debido al crecimiento de la población, se vieron obligados a construir una red de distribución de agua, la cual ya implementaba un sistema de deposición del agua residual y de las aguas lluvia. Pero los mayores arquitectos y constructores de sistemas de redes de distribución de agua que han existido en la historia, fueron los romanos, los cuales contaban con presas para el almacenamiento y retención artificial del agua. También utilizaban tratamientos por aireación como método de purificación del agua y en los sistemas de tuberías en las ciudades se utilizaba cemento, roca, bronce, plata, y madera, por lo cual las fuentes de agua estaban protegidas de contaminantes externos (Innovagua, 2012).

Para la edad media se manifestaron varios problemas relacionados con la higiene del agua y los sistemas de distribución, ya que estos arrastraban residuos y excremento, lo que generaba gran cantidad de enfermedades. Para 1806, en París, empieza a funcionar la mayor planta de tratamiento de agua, donde se dejaba sedimentar el agua durante doce horas, antes de su filtración, en filtros de arena y carbón (Lenntech, 1998).

Posteriormente en 1914, Arden y Locket, publican su trabajo sobre lodos activados y se construye la Primera Planta de tratamiento de lodos activados en el Inglaterra en 1923. Pocos años después en Alemania, Imhoff desarrolla los "Tanques Imhoff", al darle a un sedimentador estático la capacidad de almacenar sedimentos y capturar gases (González, 2011).

A partir de la mitad del siglo XX, el tratamiento de las aguas residuales se vuelve mucho más sistemático, existiendo plantas con tratamiento primario, secundario y terciario. Es así que en Estado Unidos, para el año 1988 contaba con 15.701 plantas de tratamiento de agua residual (Metcalf & Eddy, 2004).

Centrándose en Latinoamérica, se menciona acerca del tratamiento de las aguas residuales de tres países en específico Brasil, Chile y México. Para posteriormente centrarse en el caso de Ecuador.

En Brasil, el 67.2% de la población tiene acceso a redes de saneamiento de aguas residuales, contando con los servicios de agua, alcantarillado sanitario, manejo de residuos sólidos y aguas pluviales. En la última década el saneamiento del agua entro efectivamente, en la agenda de políticas públicas de dicho país, donde se aprobó un nuevo marco legal para la prestación de servicios, que promuevan la higiene y educación sanitaria; la disposición de excretas; la recolección, tratamiento y disposición sanitaria de lodos sépticos y residuos sólidos; y el tratamiento de aguas residuales (Latinosan, 2007).

En Chile, la población urbana cuenta con una cobertura del 95.2% en alcantarillado y una cobertura del 84.3% con respecto del tratamiento de aguas servidas. Pero sobre el saneamiento de la ciudad se presenta un aspecto crítico, el cual es que no existe una institución responsable de las aguas residuales del sector rural ni del servicio de agua potable en dichas zonas dispersas. Respecto a las políticas y estrategias de este país, se elaboró un reglamento para el manejo y reutilización de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas servidas, se plantearon planes de construcción de sistemas de alcantarillado en sectores rurales, con el objetivo de mejorar las condiciones de vida de la población que posee menos recursos (Latinosan, 2007).

Finalmente en México, según los resultados del Censo de Población y Vivienda del 2005, la cobertura nacional de alcantarillado y saneamiento básico es de 85.6%, lo que representa un servicio para 35.6 millones de habitantes, 26 millones de las zonas urbanas y 9.6 millones de las zonas rurales. En este país la política de saneamiento de agua sigue principalmente las siguientes líneas estratégicas: A) tratar las aguas residuales generadas y fomentar su reúso e intercambio; B) incrementar el número de habitantes con servicios de agua potable y alcantarillado en las comunidades rurales, induciendo la sostenibilidad de los servicios; y C) incrementar el número de habitantes con servicios de agua potable y alcantarillado en comunidades urbanas (Latinosan, 2007).

Es así que en varios países de Latinoamérica, algunos años atrás ya se empezó a tomar una conciencia sobre el manejo y el tratamiento del agua residual. Ya enfocándose en Ecuador, y directamente en Quito, ciudad que está asentada en una zona de características montañosas, con quebradas y ríos que atraviesan la misma. Principalmente los ríos Machángara, Monjas y Pita, que en su confluencia forman el Rio San Pedro y posteriormente el Rio Guayllabamba. Nunca ha contado con un sistema de tratamiento de aguas residuales, por lo cual las mismas se han depositado directamente en estos sistemas hídricos y en las quebradas de la ciudad, lo que por obvias razones provoca un impacto ambiental crítico (Hazen and Sawyer, 2011).

En algún momento todas las poblaciones se verán en la necesidad de gestionar sus aguas residuales, una forma de esto es implementar un sistema de alcantarillado. Para Quito, los orígenes del sistema de alcantarillado se remontan al año 1905, con la construcción de un colector, en la quebrada Jerusalén, ubicada en el centro histórico de la ciudad. La necesidad de entubar las quebradas para posteriormente rellenarlas y construir pasos viales que unirían los distintos barrios de la ciudad, fue el motivo principal por el cual los cauces del centro histórico empezaron a ser canalizados. Para ese entonces el concepto que se tenía sobre las quebradas era que servían para evacuar las aguas de lluvia y para descargar las aguas servidas y la basura sin percatarse del grave problema ambiental que esto conllevaba.

El proceso de construcción de sistemas de recolección de aguas residuales y pluviales comienza en el siglo XX, en los barrios del Centro Histórico. A partir de los años 40, se continúa con la canalización de calles y quebradas en las zonas norte y sur de la ciudad. Es importante señalar que la ciudad de Quito está atravesada por más de 33 quebradas y cauces importantes, que en la actualidad en su mayoría han sido embaulados y/o rellenados (Hazen and Sawyer, 2011).

En 1997 se crea el Plan maestro de Alcantarillado, con el objetivo de evacuar las aguas residuales y aguas de lluvia del Distrito Metropolitano de Quito, en un horizonte del proyecto al año 2025. Las soluciones que contemplaba este Plan Maestro fueron, rehabilitación de colectores deficientes, construcción de nuevos colectores y de interceptores que captan las descargas de aguas servidas,

embaucamiento de algunas quebradas, ampliación de la cobertura de redes de alcantarillado, entre otros (Hazen and Sawyer, 2011).

Desde que se originó el sistema de alcantarillado de la ciudad, fue un sistema de tipo combinado, el cual consiste en evacuar en un solo efluente las aguas de lluvia, las aguas servidas y la basura que arrastran estas, a las quebradas de la ciudad. A este problema se combina un proceso de poblamiento agresivo y desordenado en las laderas que bordean la ciudad, lugares no aptos para urbanizarse. Esta mala urbanización representa una fuente de contaminación directa, ya que la disposición de aguas servidas de dichas poblaciones es inmediata a los cuerpos receptores sin ningún tipo de tratamiento previo. Dado que para la municipalidad es muy difícil dotar de servicios básicos a esos lugares, da cabida a una creciente contaminación del ambiente. Así se encuentra que los efluentes que van a parar a las quebradas y los ríos de Quito se constituyen de materia orgánica, compuestos tóxicos y microorganismos patógenos procedentes de desechos humanos y actividades industriales (Hazen and Sawyer, 2011).

Como es evidente la ciudad de Quito, hasta ese entonces, solo se planteaba objetivos de recolección y direccionamiento del agua residual. Todavía no se planteaban objetivos de tratamiento de aguas para la mitigación de dichos efluentes. Pero recientemente se conoce que, desde el año 2010, se vienen ejecutando los diseños definitivos de las obras de intercepción y tratamiento de las aguas residuales de parroquias rurales que descargan a los ríos de la ciudad. La propuesta final de estos nuevos planes, comprende el diseño, implementación y manejo de 30 plantas de tratamiento de aguas residuales, una metropolitana, cuatro medianas y 25 pequeñas (INP, 2011). La Planta de tratamiento de Aguas Residuales Metropolitana, estará ubicada en el sector de Vindobona, al norte de la ciudad. En la ejecución de este proyecto se encuentran involucradas principalmente tres entidades, el Instituto de Nacional de Preinversión (INP) quienes se encargarán del financiamiento del proyecto, Empresa Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito y la Asociación Hazen and Sawyer – pi Épsilon, instituciones que se encargarán de los estudios y diseños definitivos.

Para diseñar y construir la Planta de Tratamiento de Aguas final, con éxito, la Asociación Hazen and Sawyer – pi Épsilon, decidió construir una Planta Piloto de

Aguas residuales, al final del colector central de Iñaquito, donde se determinarán y obtendrán ciertos parámetros o herramientas, necesarias para dichos diseños definitivos. Dentro de estas herramientas se encuentra, la determinación de los coeficientes de sedimentación, motivo de la presente investigación.

### 1.3. IMPORTANCIA

Por lo ya mencionado, la determinación de coeficientes de sedimentación en la Planta Piloto de lodos activados de la descarga del Batán, es de interés principal de la Asociación Hazen and Sawyer – pi Épsilon , para el diseño definitivo de la Planta de Tratamiento Vindobona y para la sociedad en conjunto, ya que este proyecto de tesis arrojará un aporte técnico – científico e histórico a la investigación académica de la ciudad de Quito, dado que es la primera planta de tratamiento de aguas residuales de lodos activados, destinada para esta ciudad.

Las herramientas generadas por la Asociación Hazen and Sawyer – pi Épsilon, para la determinación de los coeficientes de sedimentación, permitirá reducir costos de investigación y facilitará el tiempo de trabajo experimental.

La determinación de coeficientes de sedimentación en la Planta Piloto de lodos activados de la descarga del Batán, es necesidad fundamental para el diseño de la Planta de Tratamiento Final y además aportará mediante su funcionamiento, al programa de descontaminación de los ríos de la cuenca alta del Rio Guayllabamba.

## 1.4. OBJETIVOS

### 1.4.1. Objetivo general

Determinar los coeficientes de sedimentación de lodos en la Planta Piloto de lodos activados de la descarga del Batán para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Vindobona.

### 1.4.2. Objetivos específicos

- Estudiar la sedimentación a lo largo de las fases de la Planta Piloto de Tratamiento de Agua Residual.
- Obtener las constantes de velocidad de sedimentación de zona.

## 1.5. DESCRIPCIÓN DEL LUGAR

### 1.5.1. Ubicación de la Planta Piloto de Tratamiento de Agua Residual

La Planta Piloto de Tratamiento de agua residual se encuentra ubicada al final del colector de Iñaquito en la descarga de El Batán. Mismo que recoge las aguas residuales y de lluvia desde el sector el Ejido hasta el sector de Cotocollao, siendo este colector el más grande de la ciudad.

La dirección exacta de la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales es, Gonzalo Rubio y primer pasaje, Sector González Suarez. En la figura 1, se indica, a través de una fotografía satelital, la ubicación de la Planta Piloto.

La Planta Piloto se encuentra en la zona 17M con las coordenadas: 781284.86m E; y 9978516.13m S. La elevación de la planta es 2751 m.s.n.m (Google Earth, 2015).



Figura 1: Ubicación de la Planta Piloto

Fuente: Fotografía obtenida de Google Earth.

(Elaborado por Mendoza J.)

### 1.5.2. Operación de la Planta Piloto de Tratamiento de Agua Residual

La Planta Piloto fue diseñada para simular y obtener los parámetros de cinética de las tres fases de diseño conceptualizadas en la remoción de contaminantes. Estas fases son:

Fase 1: Remoción exclusiva de materia carbonácea expresada como DBO5

Fase 2: Remoción de materia carbonácea y nitrificación del amoníaco a nitrato

Fase 3: Remoción de materia carbonácea, nitrificación del amoníaco a nitrato y desnitrificación

Los objetivos Básicos del Tratamiento para la PTAR Vindobona para las tres fases se indican en la tabla 4-1.

**Tabla 1: Límites de Efluente de Fases de Planta Piloto**

Fase	DBO	SST	Nitrógeno NH3-N	NOx-N
Fase 1 -Remoción de Carbono	≤ 15 mg/L	≤ 30 mg/L	NA	NA
Fase 2 –Nitrificación	≤ 15 mg/L	≤ 30 mg/L	≤ 1 mg/L	NA
Fase 3 – Remoción de Nitrógeno	≤ 15 mg/L	≤ 30 mg/L	≤ 1 mg/L	≤ 10 mg/L

Fuente: (Hazen and Sawyer, 2014).

La Planta Piloto, comprende una flexibilidad experimental en la cual se realizarán todas las pruebas necesarias para el desarrollo de información de soporte para los diseños definitivos de la Planta Metropolitana Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales de Quito. Esta fue diseñada para adaptarse de una fase a otra, solo con la manipulación de las válvulas, ubicadas a lo largo del proceso, mismas que sirven para aislar unidades (reactores) y variar los procesos, desviando los flujos de agua según el modelo a ser simulado. Es necesario aclarar que antes de la Fase 1, hubo una etapa de desarrollo o crecimiento de la masa celular o microorganismos (etapa de adaptación), crecimiento necesario antes de iniciar el funcionamiento de la Planta Piloto.

Los diferentes tanques componentes del proceso de lodos activados de la Planta Piloto, se construyeron de material de fibra de vidrio, con las dimensiones y volúmenes que se indican en la tabla 4-2.

**Tabla 2: Características Físicas de los Tanques Componentes de la Planta Piloto**

Item	Descripción	Unid.	Diám.	Prof. Total	Borde Libre	Prof. Neta	Área	Vol. Útil
No.		No.	(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(L)
1	Tanque de Rejillas de Desecho Crudo (sección cuadrada)	1	0.38 x 0.38 x 0.5		0.069	0.144	0.14	62
2	Tanque de	1	0.53	0.84	0.13	0.71	0.22	159

	ecualización							
3	Clarificador primario (fondo cónico)	1	0.53	0.84	0.17	1.19	0.22	125
4	Tanque de mezcla y selector 1 (fondo plano)	1	0.43	1.09	0.20	0.89	0.15	131
5	Tanque de mezcla y selector 2 y 3 (fondo plano)	2	0.86	1.09	0.13	0.96	0.58	510
6	Tanque de aireación (fondo plano)	3	0.79	1.22	0.20	1.02	0.49	500
7	Clarificador secundario (fondo cónico)	1	0.76	1.19	0.17	1.19	0.46	333
8	Tanque de efluente de Sedimentador (fondo plano)	1	0.55	0.84	0.13	0.71	0.24	159

Fuente: (Hazen and Sawyer, 2014).

Dentro de la Planta Piloto también existen varios equipos los cuales son fundamentales para su funcionamiento y operación, los principales equipos se describen a continuación:

- Bombas de aguas crudas (bomba sumergible) ubicada en el canal de aguas residuales de la descarga del Batán.
- Bombas de alimentación de agua ecualizada.
- Bombas de recirculación de lodos del fondo del sedimentador secundario.
- Blowers, equipos encargados de introducir aire a los reactores aeróbicos del proceso.
- Agitadores con hélices, para obtener mezcla completa en los reactores anóxicos.
- Un Controlador Lógico Programable PLC, a través del cual se controla todos los equipos mencionados anteriormente.

### 1.5.3. Descripción de las Fases operación en la Planta Piloto

Según Hazen and Sawyer, en el Protocolo Básico Experimental: Operación y Monitoreo, de la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales de Quito, del 2014, la planta piloto operó en sus diferentes fases de la siguiente manera:

Dentro de todas las fases existirá un proceso de alimentación de agua residual cruda desde el canal del colector Iñaquito, descarga El Batán, afluente que se dirige hacia el tanque de rejillas o cribado. Este es usado para remover cualquier sólido grande que pueda impactar o afectar en la operación de los equipos del resto del proceso.

Después de este tanque el agua cruda se dirige al tanque ecualizador, donde se controla el retorno del sobreflujo o exceso de agua al canal. Desde este tanque el agua cruda es enviada al resto de los tanques por medio de bombas, las cuales tienen un sistema de regulación para lograr un caudal específico en cada fase.

Una vez que el agua empieza a ser alimentada desde el tanque ecualizador, esta se dirige al sedimentador primario, para remover los sólidos sedimentables, los cuales tendrán que ser extraídos regularmente del fondo de dicho tanque. El agua decantada entra en una caja de distribución, donde el agua se reparte en un tercio del caudal, al mismo tiempo, a los diferentes reactores aireados del proceso de lodos activados de alimentación escalonada.

Todos los reactores aeróbicos, cuentan con una pequeña zona no airada para mejorar la sedimentabilidad de los lodos activados.

#### Fase 1: Remoción de DBO/DOO

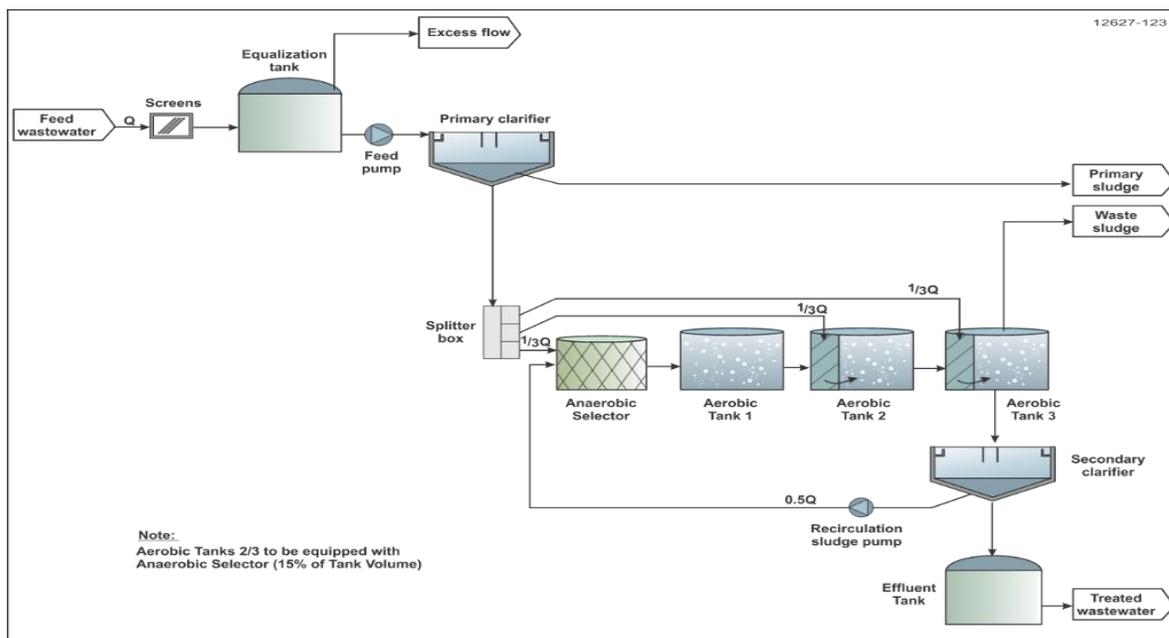
En esta fase se incorpora un reactor anóxico, el cual está en constante mezcla por medio de un motor y una hélice, después el proceso de lodos activados por alimentación escalonada continua (tres reactores aeróbicos).

Después del último o del tercer reactor aeróbico el agua tratada ingresa al sedimentador secundario donde se separan los sólidos sedimentables y se

clarifica el agua para el efluente final. El lodo sedimentado en el clarificador secundario es recirculado por medio de bombas, las cuales tienen un sistema de regulación, para lograr un caudal específico, hacia el primer tanque anóxico.

El exceso de lodos activados es extraído (purgado) del proceso directamente del tercer Reactor aireado.

En la figura 2, se esquematiza los tanques que estuvieron en funcionamiento, en la Fase 1 de la Planta Piloto.



**Figura 2: Fase 1, Configuración Esquemática Remoción de DBO/DQO**

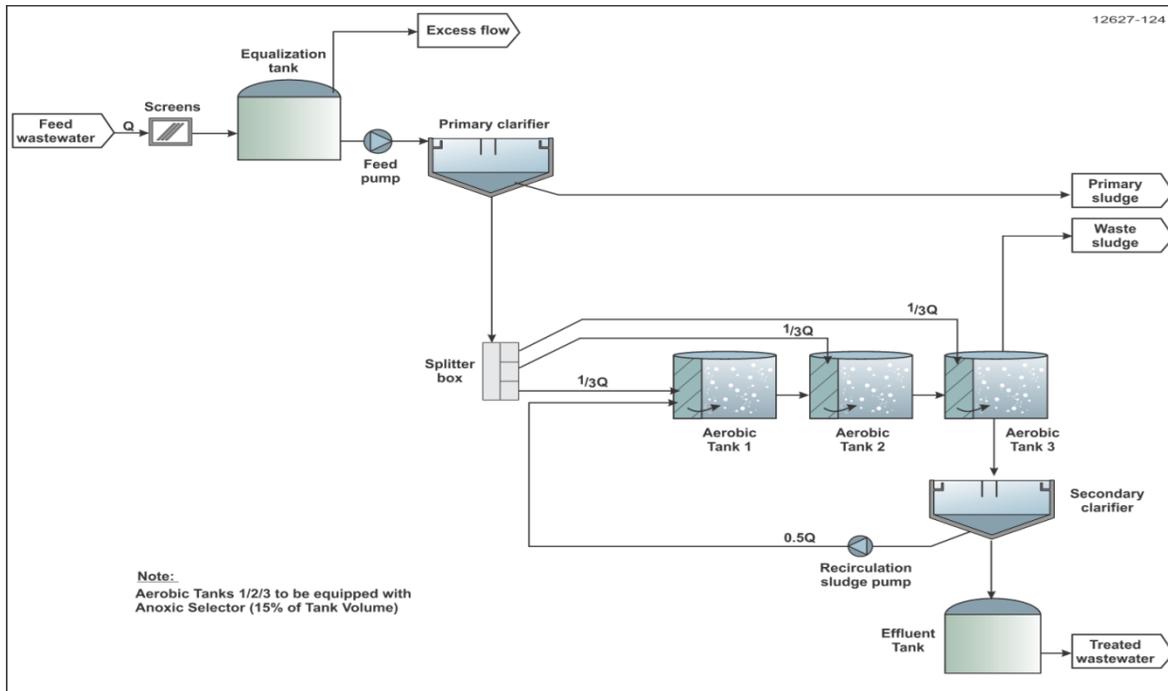
Fuente: (Hazen and Sawyer, 2014).

### Fase 2: Proceso de Nitrificación: remoción de nitrógeno

En esta fase después de la caja de distribución, el agua ingresa directamente al primer reactor aeróbico, y continúa el proceso de alimentación escalonada. En este caso los lodos sedimentados en el clarificador secundario, son recirculados a la parte anóxica del primer reactor.

El exceso de lodos activados es extraído (purgado) del proceso directamente del tercer Reactor aireado.

En la figura 3, se esquematiza los tanques que estuvieron en funcionamiento, en la Fase 2 de la Planta Piloto.



**Figura 3: Fase 2, Configuración Esquemática Nitrificación**

Fuente: (Hazen and Sawyer, 2014).

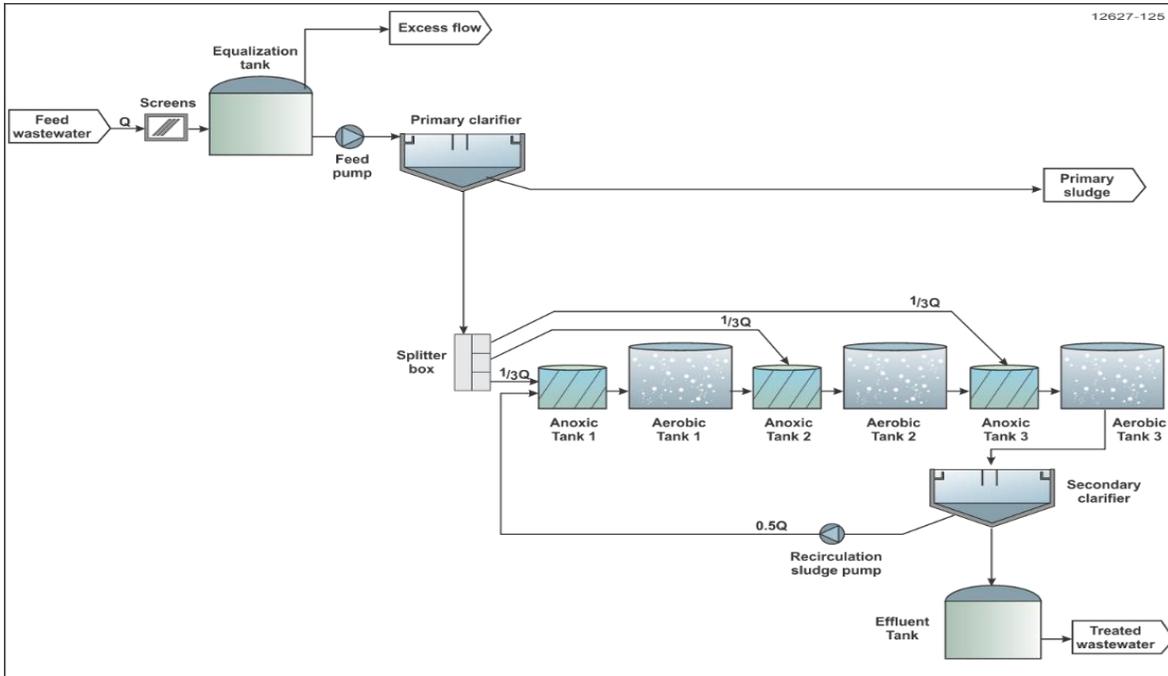
### Fase 3: Proceso de Nitrificación/desnitrificación: remoción de nitrógeno

En esta fase entran en operación todos los reactores (anóxicos y aeróbicos), los cuales se encuentran intercalados en el proceso de lodos activados. En cada reactor anóxico se encuentra una hélice y un motor para mantener una mezcla homogénea en dichos reactores.

Una vez que el agua tratada ingresa al sedimentador secundario donde se separan los sólidos sedimentables y se clarifica el agua para el efluente final, el lodo sedimentado en el clarificador secundario es recirculado, hacia el primer tanque anóxico.

El exceso de lodos activados es extraído (purgado) del proceso directamente del tercer Reactor aireado.

En la figura 4, se esquematiza los tanques que estuvieron en funcionamiento, en la Fase 3 de la Planta Piloto.



**Figura 4: Fase 3, Configuración Esquemática Nitrificación / Desnitrificación**

Fuente: (Hazen and Sawyer, 2014).

## II. MARCO TEÓRICO

Para el desarrollo del presente estudio se tomó en cuenta varias experimentaciones que han sido previamente realizadas y que sobre todo han empleado el mismo método de investigación propuesto, por lo tanto sirvieron como una guía para la metodología y el desarrollo teórico experimental a seguir.

El primer documento revisado es la tesis de Victoria Zarate, Estudios de Sedimentadores de Lodos Secundarios de Plantas de Tratamiento de Aguas residuales Municipales del Estado de Nuevo León, publicado en 1995, donde el propósito del trabajo fue obtener información de parámetros adecuados a las condiciones locales, para dimensionar los clarificadores finales de plantas de tratamiento por lodos activados de aguas residuales domésticas de Nuevo León, en base a pruebas de sedimentación en columnas de lodos activados. Los estudios de sedimentación y espesamiento se efectuaron en varias plantas de tratamiento, el equipo a nivel de laboratorio consistió en columnas de acrílico, con dimensiones de 6" de diámetro y 1.20 m de alto, equipadas con agitadores metálicos (Zarate, 1995).

En este estudio se obtuvieron los factores de diseño: carga hidráulica superficial (CHS) y carga superficial de sólidos (CSS), los cuales se correlacionaron con los Parámetros de funcionamiento: relación alimento – microorganismos (F/M) y edad de lodo (TRS) para cada planta de tratamiento estudiada. Para obtener los parámetros CHS y CSS, se utilizó las gráficas obtenidas a partir de las pruebas en la columna de sedimentación, mismo que servirían para el dimensionamiento de los clarificadores finales (Zarate, 1995).

El procedimiento empleado por Zárate, (1995), en los Estudios de Sedimentadores de Lodos Secundarios de Plantas de Tratamiento de Aguas residuales Municipales del Estado de Nuevo León, para el análisis de sedimentación zonal, fue el siguiente:

Para el análisis de sedimentación zonal:

1. Una cantidad determinada de licor mixto del reactor biológico, es vertida a la columna graduada. Deben ser estudiadas diversas concentraciones de sólidos.

Cada columna de prueba debe estar provista de agitación lenta, simulando la acción de barrido en el prototipo (a escala completa). La velocidad de barrido puede ser mantenida a aproximadamente 5 rev/h.

2. Los sólidos de cada prueba deben mezclarse suavemente para obtener homogeneidad y permitir que sedimenten bajo condiciones normales.

3. La interfase se formará y su posición (altura) con respecto al tiempo de sedimentación, es registrada. Usualmente toma de 20 a 45 minutos del asentamiento a la compresión.

4. Las condiciones de la curva de sedimentación para cada concentración de SSLM, pueden ser analizadas usando la aproximación de Talmadge y Fitch y así obtener, la velocidad de sedimentación correspondiente a cada concentración.

5. Para cada concentración, el flujo de sólidos es calculado como el producto de la concentración de sólidos y la correspondiente velocidad de sedimentación, método de Coe y Clevenger et. al. El uso de la curva de flujo de sólidos es necesario para obtener el flujo límite, a la concentración deseada del caudal del lodo del fondo.

Velocidad de sedimentación de las partículas:

1) Obtener las velocidades de sedimentación zonal deducidas de cada ensayo de sedimentación en las columnas, con suspensiones de diferentes concentraciones, graficar la altura de la interfase en la columna en función del tiempo para diferentes concentraciones de sólidos.

2) Obtener la porción de la línea recta de la curva resultante es usada para determinar la velocidad de sedimentación para cada concentración.

$$\text{Velocidad de sedimentación (Vs)} = \text{altura/tiempo} \quad (1)$$

Obtener los datos de la velocidad de sedimentación zonal en m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día (CHS), y, graficar con respecto a la concentración correspondiente de sólidos suspendidos para cada prueba.

Obtener los valores correspondientes de la CHS, interpolando las concentraciones deseadas de sólidos suspendidos del licor mixto, en éste caso (y para todas las plantas estudiadas), para valores de 1000, 2000, 3000 y 4000 g/m<sup>3</sup>.

Flujo de sólidos:

Graficar el logaritmo de las velocidades de sedimentación zonal obtenidas en m/h, con respecto al logaritmo de la concentración correspondiente de sólidos suspendidos para cada prueba.

1) Utilizando los datos de la curva obtenida desarrollar la curva de flujo de sólidos, utilizando la ecuación:

$$SFG = C_i \cdot V_i / (1000 \text{ g/kg}) \quad (2)$$

$C_i$  = Concentración de sólidos, g/m<sup>3</sup>.

$V_i$  = Velocidad de sedimentación de sólidos, m/h

Graficar el valor calculado del flujo de sólidos respecto a la concentración correspondiente.

1) Representar los valores del flujo de sólidos obtenidos, respecto a la concentración.

Obtener los valores correspondientes del flujo de sólidos (CSS) trazando tangentes a la curva para las concentraciones del lodo del fondo deseadas, en este caso (y para todas las plantas estudiadas) para valores de 4000; 6000; 8000; y 10,000 g/m<sup>3</sup>

El procedimiento experimental realizado por Zárate, (1995) consistió en: tomar muestras de licor mixto, en un punto cercano a la salida del reactor, antes de pasar al clarificador final, posteriormente fueron espesadas por períodos medios de 15, 30, 45 y 60 minutos para obtener varias muestras de lodo de concentraciones diferentes, de cada una de ellas se determinó posteriormente la concentración de Sólidos Suspendidos Totales (SST). Una vez espesadas cada una de las muestras, se efectuó las pruebas de sedimentación en base al procedimiento de análisis de flujo

de sólidos, ya mencionado; así mismo, se realizaron las curvas correspondientes al análisis de flujo de sólidos (Zárate, 1995).

Después de haber realizado los cálculos necesario y obtenido todos los valores propuestos en las diferentes plantas donde se desarrollaron las pruebas de sedimentación, Zárate concluye que la relación de CSS y la CHS, varía según el tipo de reactor y su aireación, ya que en las plantas de mezcla completa estos valores se acercan al límite superior del intervalo bibliográfico recomendado y en el caso de las plantas de flujo pistón, los valores son cercanos al dato promedio del rango reportado en la literatura (Zárate, 1995).

En las pruebas de sedimentación de columna, los valores que se obtuvieron tanto para la CHS como para la CSS, en la mayoría de las plantas de tratamiento coincidieron o se acercaron más, al límite superior del rango recomendado en la literatura. En general, se obtuvo que: el 63% coincidieron o se acercaron al límite superior del rango de valores recomendados en la literatura técnica; el 23% coincidieron o se acercaron al promedio de dicho rango; y el 14% coincidió con el límite inferior del intervalo bibliográfico recomendado (Zárate, 1995).

El siguiente documento analizado, fue el de Fall, Loaiza, Esparza y Martínez, Evaluación de un clarificador secundario en una planta de tratamiento de aguas residuales, en 2007, donde se presenta la evaluación de un clarificador secundario con alimentación periférica implementado en una planta de tratamiento de aguas residuales en Monterey, México. El objetivo de este estudio fue evaluar su desempeño y obtener los parámetros del modelo de Vesilind (Fall et al, 2007).

Para llevar a cabo este estudio, se realizaron pruebas de sedimentación en columna, con el fin de producir suficientes datos cuantificables en seis escenarios de concentración de licor mezclado. En dichas pruebas se tomaron muestras de licor mezclado, lodo de retorno y efluentes sin clorar. Las pruebas se realizaron a diferentes concentraciones, en una columna de 1.52m de altura y 7 cm de diámetro, equipada con un agitador lento (Fall et al, 2007).

Para cada una de las pruebas, se registró cada 2 minutos la variación de la altura de la interfase sólido – líquido, con los datos obtenidos, se calculó la velocidad de sedimentación zonal para cada concentración de sólidos. Posteriormente con la información recolectada se construyó la curva de flujo de sólidos en base del

análisis del punto de estado y los parámetros del modelo de Vesilind (Fall et al, 2007).

Las conclusiones a las que se llegaron con los resultados del parámetro de Vesilind, fue que el lodo de la planta Noreste en Monterey, está perfectamente floculado, por lo cual sedimenta en óptimas condiciones. También dicha modelación podrá anticipar el comportamiento para diversos escenarios como incremento de flujo, cambios en la tasa de retorno y consistencia del licor mezclado (Fall et al, 2007).

El último estudio analizado es el de Contreras, Modelación del Sedimentador Secundario en Planta de Lodos Activados, en 2010, donde el objetivo fue evaluar el comportamiento del Sedimentador Secundario en una planta de tratamiento de aguas residuales de Lodos Activados con modalidad de Aireación Extendida, en condiciones de aumento en las cargas y flujos afluentes, considerando diferentes escenarios.

Contreras en su estudio Modelación del Sedimentador Secundario en Planta de Lodos Activados, en 2010 describe el proceso de Lodos Activados de la siguiente manera:

El sistema de Lodos Activados (LAC) está constituido por un estanque aireado o reactor biológico, en el cual se produce la oxidación de la materia orgánica presente en las aguas servidas, a partir del crecimiento y metabolismo de comunidades de microorganismos. Estos microorganismos viven suspendidos en flóculos o flocs, constituyentes básicos del lodo activado o licor mezclado; asimilando aeróbicamente la materia orgánica, produciendo nuevos microorganismos y compuestos inorgánicos, y agotando la materia orgánica de las aguas servidas afluentes al sistema.

En una segunda etapa, el licor mezclado pasa al sedimentador secundario, donde se separa el lodo, por sedimentación gravitacional, retornando su mayor parte al reactor a fin de mantener una alta concentración de microorganismos en el sistema; mientras que el clarificado generalmente es conducido a desinfección para su posterior descarga. El lodo en exceso es purgado hacia la línea de lodos en donde generalmente, es concentrado, estabilizado y deshidratado, para su disposición final.

Entonces, para el proceso de lodos activados es fundamental el reactor, sus componentes y el sedimentador secundario, dado que en el primero se forman los lodos y en el segundo se realiza la clarificación del agua y la recirculación de lodos al reactor para mantener una alta concentración de microorganismos.

Según Contreras, el reactor aeróbico debe cumplir tres objetivos básicos, 1) oxidar la materia orgánica biodegradable disuelta y particulada; 2) generar flocs capaces de capturar sólidos coloidales sedimentables y no sedimentables; y en algunos casos, 3) transformar o remover nutrientes, especialmente nitrógeno. También se menciona que es necesario conocer los Sólidos Suspendedos en el Licor Mezclado (SSLM), siendo la concentración de SST en el estanque de aireación. Se asume que la porción de sólidos correspondiente a la concentración de microorganismos en suspensión, se mide cómo la porción volátil de éstos (SSVLM). Los SSLM se miden en mg/L, y sus valores típicos son de 1.500 a 3.000 mg/L para LAC y de 3.000 a 6.000 mg/L para aireación extendida (LAAE); La Relación Alimento/Microorganismos (F/M), corresponde a la relación que existe entre la masa del sustrato y la masa de la población de microorganismos presentes en el sistema; y el Tiempo de Retención Celular o Edad de Lodos (TRS) que es el tiempo, en promedio, que permanece una partícula de sólido dentro del sistema (Contreras, 2010).

Con respecto al sedimentador secundario, se menciona que la clarificación, el espesamiento y el almacenamiento en el sedimentador, podrían ser afectados por los caudales de entrada y de salida al sedimentador; el área y la tasa superficial del sedimentador; la profundidad y el tiempo de retención; la forma de los dispositivos de entrada, de salida, del licor mezclado, del clarificado y de la recirculación; la configuración del estanque; las condiciones ambientales como las variaciones de temperatura y de viento; y la concentración y las características del licor mezclado afluente a la unidad, entre otras. Sin embargo, para el dimensionamiento de la unidad, los valores más relevantes son el caudal de aguas servidas y las propiedades y comportamiento del lodo (Contreras, 2010).

De esta manera Zárate y Contreras presentan que la sedimentación de los lodos está altamente influenciada por la relación alimento – microorganismos (F/M), el tiempo de retención celular o edad de lodos (TRS) y los sólidos suspendidos totales en el licor mezclado (SST o SSML), presentes en el reactor aeróbico.

Por lo tanto en la presente investigación, dichos parámetros serán fundamentales para las conclusiones y comparación de los resultados obtenidos de las pruebas que se realizaron en la columna de sedimentación en la Planta Piloto de Tratamiento de Agua residual de Quito.

Por otro lado Zárate (1995) y Fall (2007), con respecto a la metodología empleada para la realización de las pruebas de sedimentación, utilizan columnas de acrílico de diferentes dimensiones, de 6'' de diámetro y 1.20 m de alto y 1.52m de altura y 7 cm de diámetro respectivamente, en las cuales se realizó alrededor de seis ensayos a diferentes concentraciones de SST, obteniendo resultados óptimos según las conclusiones escritas en sus respectivos estudios. Por lo cual, las pruebas de sedimentación y los resultados que se obtengan serán valederos, dado que columna de sedimentación existente en la Planta Piloto, presenta las siguientes dimensiones: diámetro de 6'' y una altura de 1.685 m.

## 2.1. MARCO LEGAL

### CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR

La Constitución de la República del Ecuador, Registro Oficial N° 449 del 20 de octubre del 2008:

#### Título I: Principios Fundamentales

Art. 3.- Son deberes primordiales del Estado:

7. Defender el patrimonio natural y cultural del país.

#### Título II: Derechos

##### Capítulo II: Derechos del Buen Vivir

##### Sección II: Ambiente Sano

Art. 14.- Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir (sumakkawsay).

Se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados.

Art. 15.- El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho al agua.

##### Sección VII: Salud

#### Capítulo VII: Derechos de la Naturaleza

Art. 71.- La naturaleza o Pachamama, donde se reproduce y realiza la vida, tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el

mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos.

Toda persona, comunidad, pueblo o nacionalidad podrá exigir a la autoridad pública el cumplimiento de los derechos de la naturaleza. Para aplicar e interpretar estos derechos se observarán los principios establecidos en la Constitución, en lo que proceda.

El Estado incentivará a las personas naturales y jurídicas, y a los colectivos, para que protejan la naturaleza, y promoverá el respeto a todos los elementos que forman un ecosistema.

Art. 72.- La naturaleza tiene derecho a la restauración. Esta restauración será independiente de la obligación que tienen el Estado y las personas naturales o jurídicas de indemnizar a los individuos y colectivos que dependen de los sistemas naturales afectados.

En los casos de impacto ambiental grave o permanente, incluidos los ocasionados por la explotación de los recursos naturales no renovables, el Estado establecerá los mecanismos más eficaces para alcanzar la restauración, y adoptará las medidas adecuadas para eliminar o mitigar las consecuencias ambientales nocivas.

## Título VII: Régimen Del Buen Vivir

### Capítulo II: Biodiversidad y Recursos Naturales

#### Sección I: Naturaleza y Ambiente

Art. 395.- La Constitución reconoce los siguientes principios ambientales:

2. Las políticas de gestión ambiental se aplicarán de manera transversal y serán de obligatorio cumplimiento por parte del Estado en todos sus niveles y por todas las personas naturales o

Art. 397.- En caso de daños ambientales el Estado actuará de manera inmediata y subsidiaria para garantizar la salud y la restauración de los ecosistemas. Además de la sanción correspondiente, el Estado

repetirá contra el operador de la actividad que produjera el daño las obligaciones que conlleve la reparación integral, en las condiciones y con los procedimientos que la ley establezca. La responsabilidad también recaerá sobre las servidoras o servidores responsables de realizar el control ambiental. Para garantizar el derecho individual y colectivo a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, el Estado se compromete entre otros aspectos a:

2. Establecer mecanismos efectivos de prevención y control de la contaminación ambiental, de recuperación de espacios naturales degradados y de manejo sustentable de los recursos naturales.

#### Sección VI: Agua

Art. 411.- El Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico. Se regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua.

La sustentabilidad de los ecosistemas y el consumo humano serán prioritarios en el uso y aprovechamiento del agua.

Art. 412.- La autoridad a cargo de la gestión del agua será responsable de su planificación, regulación y control. Esta autoridad cooperará y se coordinará con la que tenga a su cargo la gestión ambiental para garantizar el manejo del agua con un enfoque ecosistémico.

### **ACUERDOS MINISTERIALES**

#### **Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente**

El Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente – TULSMA – fue expedido mediante Decreto Ejecutivo 3516 y publicado en el Registro Oficial Suplemento N° 2, del 31 de marzo de 2003. La última reforma se

realizó con Registro Oficial N° 270 del 13 de febrero de 2015, mediante el cual se sustituye el Libro VI del TULSMA.

Anexo 1 del Libro VI, NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES: RECURSO AGUA

OBJETO

El objetivo principal de la presente norma es proteger la calidad del recurso agua para salvaguardar y preservar los usos asignados, la integridad de las personas, de los ecosistemas y sus interrelaciones y del ambiente en general.

Las acciones tendientes a preservar, conservar o recuperar la calidad del recurso agua deberán realizarse en los términos de la presente Norma.

**Tabla 3: Criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces, marinas y de estuarios**

PARAMETROS	Expresados como	Unidad	Criterio de calidad	
			Aguadulce	Agua marina y de estuario
Aluminio <sup>111</sup>	Al	mg/L	0,1	1,5
Amoniaco Total <sup>12'</sup>	NH3	mg/L	-	0,4
Arsénico	As	mg/L	0,05	0,05
Bario	Ba	mg/L	1,0	1,0
Berilio	Be	mg/L	0,1	1,5
Bifenilos Policlorados	PCBs totales	mg/l	1,0	1,0
Boro	B	mg/L	0,75	5,0
Cadmio	Cd	mg/L	0,001	0,005
Cianuros	CN	mg/L	0,01	0,01
Cinc	Zn	mg/L	0,03	0,015
Cloro residual total	Cl <sub>2</sub>	mg/L	0,01	0,01
Clorofenoles <sup>11*1</sup>		mg/L	0,05	0,05
Cobalto	Co	mg/L	0,2	0,2
Cobre	Cu	mg/L	0,005	0.005

Cromo total	Cr	mg/L	0,032	0,05
Estaño	Sn	mg/L		2,00
Fenoles monohídricos	Expresado como fenoles	mg/L	0,001	0,001
Aceites y grasas	Sustancias solubles en hexano	mg/L	0,3	0,3
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/L	0,05	0,05
Hierro	Fe	mg/L	0,3	0,3
Manganeso	Mn	mg/L	0,1	0,1
Materia flotante de origen antrópico	visible		Ausencia	Ausencia
Mercurio	Hg	mg/L	0,0002	0,0001
Níquel	Ni	mg/L	0,025	0,1
Oxígeno Disuelto	OD	%de saturación	>80	>60
Piretroides	Concentración de piretroides totales	mg/L	0,05	0,05
Plaguicidas organoclorados totales	Organoclorados totales	mg/l	10,0	10,0
Plaguicidas organofosforados totales	Organofosforados totales	mg/L	10,0	10,0
Plata	Ag	mg/L	0,01	0,005
Plomo	Pb	mg/L	0,001	0,001
Potencial de Hidrógeno	PH	unidades de PH	6,5-9	6,5-9,5
Selenio	Se	mg/L	0,001	0,001
Tensoactivos	Sustancias activas al azul	mg/L	0,5	0,5

	de metileno			
Nitritos	N0 <sub>2</sub>	mg/L	0,2	
Nitratos	N0 <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	13	200
DB0 <sub>5</sub> <sup>4)</sup>	DBO <sub>s</sub>	mg/L	-	
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/L	max incremento de 10% de la condición natural	no aplica

1 Aluminio: Si el pH es menor a 6,5 el criterio de calidad será 0,005 mg/L.

2 Aplicar la Tabla 3a como criterio de calidad para agua dulce

3 Si sobrepasa el criterio de calidad se debe analizar el diclorofenol cuyo criterio de calidad es 0,2 ug/L.

4 Aplicar la Tabla 3b como criterio de calidad para agua dulce

Fuente: Tabla 3, Anexo 1 Libro VI Acuerdo Ministerial MAE 028

**Tabla 4 Criterios de calidad admisible del amoniac total para la protección de la vida acuática (mg/LNHJ)**

Temp. (C)	PH							
	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	10
0	231	73	23,1	7,32	2,33	0,749	0,250	0,042
5	153	48,3	15,3	4,84	1,54	0,502	0,172	0,034
10	102	32,4	10,3	3,26	1,04	0,343	0,121	0,029
15	69,7	22	6,98	2,22	0,715	0,239	0,089	0,026
20	48	15,2	4,82	1,54	0,499	0,171	0,067	0,024
25	33,5	10,6	3,37	1,08	0,354	0,125	0,053	0,022
30	23,7.	7,5	2,39	0,767	0,256	0,094	0,043	0,021

“El amoniac presenta alta solubilidad en el agua y su difusión es afectado por una amplia variedad de parámetros ambientales como pH, Temperatura y fuerza iónica. En soluciones acuosas existe un equilibrio entre las especies de amoniac ionizado (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) y no ionizado (NH<sub>3</sub>). El amoniac no ionizado se refiere a todas las formas de amoniac en el agua excepto

el ion amonio ( $NH_4^+$ ). El amoniaco ionizado se refiere al ion amonio. El término "amoniaco total" es usado para describir la suma de concentraciones del Amoniaco ( $NH_3$ ) y el ion amonio ( $NH_4^+$ ) y puede expresarse como Nitrógeno Amoniacal Total, debido a que los dos compuestos tienen pesos moleculares ligeramente diferentes".

Fuente: Tabla 3a, Anexo 1 Libro VI Acuerdo Ministerial MAE 028

**Tabla 5 Criterios de calidad admisible de la DBO5 para la protección de la vida acuática**

Objetivos de calidad	DBO5 (mg/L)	Condición de la vida acuática*
<b>I</b>	<b>1</b>	Vida acuática no impactada
<b>II</b>	<b>1-2</b>	Vida acuática no impactada
<b>III</b>	<b>2-6</b>	Vida acuática con impacto moderado

*"\*A lo largo de un río desde su nacimiento hasta la confluencia con otros ríos, se podrán establecer tres niveles de calidad de acuerdo a la concentración de DBOs y según los criterios de la tabla 3b".*

Fuente: Tabla 3b, Anexo 1 Libro VI Acuerdo Ministerial MAE 028

### Resolución N°0002

Esta fue emitida en el año 2008, donde se publica el Anexo A, Límites máximos permisibles por cuerpo receptor:

**Tabla 6: Límites máximos permitidos por cuerpo receptor.**

PARÁMETROS	EXPRESADO COMO	UNIDAD	LIMITE MÁXIMO PERMISIBLE	
			Alcantarillado	Cauce de agua
Aceites y grasas	A y G	mg/L	100	50
Aluminio	Al	mg/L	5,0	5,0
Arsénico total	As	mg/L	0,1	0,1
Cadmio	Cd	mg/L	0,02	0,02
Caudal máximo	-	L/s	q,5 veces el caudal (1)	4,5 dato referencial
Cianuro	CN+	mg/L	1,0	0,1
Cobre	Cu	mg/L	1,0	1,0
Cromo Hexavalente	Cr+5	mg/L	0,5	0,5

Compuestos fenólicos	Expresado como fenol	mg/L	0,2	0,2
Fósforo Total	P	mg/L	15	10
Hidrocarburos Totales	TPH	mg/L	20	20
Materia flotante	Visible	-	Ausencia	Ausencia
Maganeso	Mn	mg/L	10	2,0
Mercurio (total)	Hg	mg/L	0,01	0,005
Níquel	Ni	mg/L	2,0	2,0
Organoclorados totales	Concentración	mg/L	0,05	0,05
Organofosforados totales	Concentración	mg/L	0,1	0,1
Plomo	Pb	mg/L	0,5	0,2
Potencial de hidrógeno	pH	mg/L	5-9	5-9
Sólidos Sedimentables	-	C°	10	1,0
Sulfuros	S	mg/L	1,0	0,5
Sulfatos	SO4	mg/L	400	1000
Temperatura	-	mg/L	< 40	< 35
Tensoactivos	MBAS (2)	mg/L	0,5	0,5
Zinc	Zn	mg/L	2,0	2,0

(1) Caudal promedio horario del sistema de alcantarillado.

(2) Sustancias activas al azul de metileno.

Fuente: Tabla A. 1, Anexo 1, Resolución N°0002, Quito.

## 2.2. MARCO CONCEPTUAL

### 2.2.1. Sedimentación

Según Metcalf y Eddy, la sedimentación consiste en la separación, por acción de la gravedad, de las partículas suspendidas cuyo peso específico es mayor que el agua. Esta es una de las operaciones unitarias más utilizadas en el tratamiento de aguas, se emplea para la eliminación de arenas, materia en suspensión en flóculo biológico en los clarificadores secundarios de lodos activados, entre otros. En la mayoría de sistemas en los cuales se utiliza sedimentación, el objetivo principal es obtener un efluente clarificado, pero también es necesario producir un lodo o fango cuya concentración de sólidos permita su fácil tratamiento y manejo (Metcalf y Eddy, 2004).

También existen varios tipos de sedimentación, los cuales son descritos a en la Tabla 2-5.

**Tabla 7: Tipos de sedimentación y su descripción**

Tipo de Sedimentación	Descripción	Aplicación/situaciones en que se presenta
Tipo 1. De partículas discretas.	Se refiere a la sedimentación de partículas en una suspensión con baja concentración de sólidos, donde las partículas sedimentan como entidades individuales y no existe interacción sustancial con las partículas vecinas.	Eliminación de las arenas del agua residual.
Tipo 2. Floculenta	Se refiere a una suspensión bastante diluida de partículas que se agregan, o flocculan, durante el proceso de sedimentación. Estas partículas pueden unirse, aumentando así su masa y por lo tanto su velocidad de	Eliminación de una fracción de los sólidos en suspensión del agua residual bruta en los tanques de sedimentación primaria, y en la zona superior de los

	sedimentación.	decantadores secundarios.
Tipo 3. Retardada o sedimentación zonal.	Se refiere a suspensiones de concentración intermedia, en las partículas con suficientes para entorpecer la sedimentación de las partículas vecina. Las partículas tienden a permanecer en posiciones relativas fijas, y la masa de partículas sedimenta como una unidad, se desarrolla una interfase sólido – líquido en la parte superior de la masa que sedimenta.	Se utiliza en los tanques de sedimentación secundaria empleados en las instalaciones de tratamiento biológico.
Tipo 4. Compresión	Es la sedimentación en la que las partículas están concentradas de tal manera que se forma una estructura, y la sedimentación solo puede tener lugar como consecuencia de la compresión de esta estructura.	Generalmente, se produce en las capas inferiores de una masa de fango de gran espesor, tal como ocurre en el fondo de los decantadores secundarios profundos y en las instalaciones de espesamiento de fangos.

Fuente: (Metcalf y Eddy, 2004).

Debido a la cantidad de sólidos que se espera generar en el proceso de lodos activados de la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas de Quito, el tipo de sedimentación que se espera, es el de sedimentación zonal o retardada.

Para estudiar este fenómeno de sedimentación se emplean una columna de sedimentación donde se determina la velocidad de sedimentación zonal, en una prueba Batch, donde se mide la altura de la interfase cada cierto intervalo de tiempo. Estas pruebas también pueden servir realizar otros tipos de estudio como, determinación de la superficie necesaria para el espesado de los fangos a partir de

los resultados de un ensayo de sedimentación simple y determinación de la superficie necesaria a partir del análisis del flujo de sólidos (Metcalf y Eddy, 2004).

### 2.2.2. Lodos Activados

El lodo activado consiste en una masa floculenta de microorganismos, materia orgánica muerta y materiales inorgánicos. Son utilizados para transformar la materia orgánica existente en el agua residual en materia orgánica disuelta y finalmente dividida en flóculos biológicos sedimentables y en sólidos orgánicos que se puedan eliminar en los fangos de sedimentación. En este proceso la comunidad biológica de los lodos activados dependerá de: naturaleza del suministro alimenticio (características del agua residual), concentración del alimento, turbulencia, temperatura, tiempo de aireación y concentración (Romero, 2010).

El proceso de lodos activados consiste básicamente en que las aguas residuales crudas fluyen en el tanque de aireación con su contenido de materia orgánica (DBO) como suministro alimenticio. Posteriormente las bacterias metabolizan los residuos produciendo nuevas bacterias, utilizando oxígeno disuelto y liberando dióxido de carbono. Luego esta mezcla líquida con flóculos biológicos en suspensión, ingresa a un sedimentador, donde es separada y se genera un efluente clarificado. La materia en suspensión que ha sido separada, es recirculada al tanque de aireación (Romero, 2010).

#### 2.2.2.1. *Relación alimento / microorganismos (F/M)*

Dentro del proceso de lodos activados, existen varias relaciones con respecto a la materia orgánica, los nutrientes del agua y la oxigenación. Pero las más relevantes e influyentes en el proceso de sedimentación son: la relación alimento/microorganismos (F/M) y el tiempo de retención celular (TRC).

Para esto Romero (2010) y Metcalf & Eddy (2004), definen la relación Alimento/microorganismo como:

$$F/M = \frac{S_0}{\theta X} \quad (3)$$

Donde, F/M = Relación alimento/microorganismos, gDBO/d/gSSLM.

$S_0$  = concentración de DBO o DQO en el afluente, mg/m<sup>3</sup>.

$\Theta$  = tiempo de retención hidráulica del tanque de aireación.

$X$  = concentración de sólidos suspendidos volátiles en el tanque de aireación, kg/m<sup>3</sup>.

El tiempo de retención hidráulico se define como:

$$\theta = \frac{V}{Q} \quad (4)$$

Donde,  $\Theta$  = tiempo de retención hidráulica del tanque de aireación.

$V$  = caudal del afluente, L/día.

$Q$  = volumen del reactor, L.

Según Romero, en su publicación Tratamiento de Aguas Residuales, 2010, los valores recomendados de F/M son desde 0,2 hasta 0,6 gDBO/d/gSSLM

#### 2.2.2.2. *Tiempo de retención celular*

Con respecto al tiempo de retención celular o edad de lodo este está definido por:

$$\theta_c = \frac{V_r X}{Q_w X_w + Q_e X_e} \quad (5)$$

Donde,  $\theta_c$  = tiempo promedio de retención celular basado en el volumen del tanque de aireación, días.

$V_r$  = volumen del tanque de aireación, m<sup>3</sup>.

$X$  = concentración de sólidos suspendidos volátiles en el tanque de aireación,  $m^3/d$ .

$Q_w$  = caudal de fango purgado,  $m^3/d$ .

$X_w$  = concentración de sólidos volátiles en el fango purgado,  $kg/m^3$ .

$Q_e$  = caudal del efluente tratado,  $m^3/d$ .

$X_e$  = concentración de sólidos suspendidos volátiles en el efluente tratado,  $kg/m^3$ .

Estos parámetros son importantes para la sedimentación en la planta ya que, a medida que el floc crece y envejece, cambia su composición bacteriana, ya que el lodo pasa por diferentes fases de crecimiento, maduración y declive. Por lo tanto, un floc biológico que se aglomera, sedimentará bien por acción de la gravedad dejando un sobrenadante claro, por lo contrario un floc pobre, liviano o flotante de crecimiento filamentosos, no sedimentará por gravedad y contribuirá con DBO y SST en el efluente. Esta capacidad de aglomeración o flotación que presente el lodo estará dado por las relaciones  $F/M$  y  $TRC$ , y por lo tanto la capacidad de sedimentación de los lodos dependerá de estos parámetros (Romero, 2010).

### III. METODOLOGÍA

Se utilizó el método Inductivo-Deductivo, ya que emplea un modelo matemático para la determinación de los coeficientes de sedimentación, a partir de los datos obtenidos en el campo.

El nivel de estudio fue experimental, donde se determinó los coeficientes de sedimentación en base a modelos matemáticos, a partir del levantamiento de datos in situ y los resultados del laboratorio certificado; y descriptivo: debido al aporte teórico y metodológico que representará para estudios posteriores.

La modalidad de investigación empleada fue de campo, ya que todos los datos, fueron obtenidos directamente de la descarga de agua residual del Batán, mismos que fueron analizados, descritos, interpretados y registrados ese momento.

Las pruebas de sedimentación se realizaron durante las tres fases principales de funcionamiento de la Planta Piloto y a su vez se enviaban las muestras tomadas de las pruebas realizadas en la columna al laboratorio certificado, para la determinación de sólidos en suspensión totales.

#### 3.1.Población y muestra

La población estuvo constituida por el afluente entrante a la Planta Piloto, el cual fue bombeado desde la descarga de agua residual del Batán. Por la ubicación de la Planta Piloto se podía obtener un desecho fresco, el cual era el más representativo del agua residual a tratarse en la PTAR definitiva de Vindobona.

La muestra está constituida específicamente por la cantidad de licor mezclado tomada de los reactores aeróbicos existentes en el proceso de lodos activados y por el lodo de retorno de la Planta Piloto. Según Eckenfelder, 1970 en su publicación Control de Contaminación del Aguas y Metcalf & Eddy, 2002, en Ingeniería de aguas Residuales Tratamiento, Vertido y Reutilización, para determinar las constantes de velocidad de sedimentación zonal, se debe alizar mínimo tres pruebas de sedimentación, pero por fines de esta investigación se realizaron

alrededor de 10 a 15 pruebas de sedimentación. De cada ensayo se tomaba una muestra para ser analizada en el laboratorio.

Para poder determinar el tiempo de retención celular se tomó muestras simples diarias de 250ml de los reactores de la planta piloto y para la relación alimento – microorganismos, se tomaba una muestra compuesta, con un muestreador automático, el cual tomaba 250ml de efluente primario cada treinta minutos durante 24 horas. Todas las muestras enviadas siempre conservaban una cadena de frío, desde los muestreadores automáticos hasta su llegada al laboratorio.

### **3.2.Laboratorio**

Para determinar los coeficientes de sedimentación, es necesario conocer la concentración de sólidos suspendidos totales de cada prueba realizada en la columna. Para esto la Asociación Hazen & Sawyer trabajó en conjunto con el laboratorio acreditado L3C, al cual eran enviadas las muestras de la columna de sedimentación para determinar la cantidad de sólidos suspendidos totales de cada ensayo. También el laboratorio analizó y determinó los parámetros de DBO y sólidos suspendidos volátiles, de las muestras tomadas diariamente en las distintas fases de operación. Dichos parámetros fueron utilizados para determinar los diferentes tiempos de retención celular y las relaciones F/M, con las que se operó la Planta Piloto.

### **3.3.Procesamiento de datos**

Para el procesamiento de datos se utilizó la herramienta de computación Microsoft Excel, donde se introdujeron todos los datos experimentales obtenidos de los ensayos de sedimentación realizados y de las muestras tomadas en la Planta Piloto. En este programa se realizó los cálculos necesarios para obtener los coeficientes de sedimentación, tiempo de retención celular y relación F/M.

### 3.4.Equipos

- Columna de acrílico graduada.
- Bomba de succión.
- Cronómetro
- Cámara fotográfica
- Ordenador

### 3.5.Procedimiento de estudio de sedimentación en columna

#### 3.5.1. Análisis de la sedimentación zonal

Es necesario mencionar que varios autores difieren en la dimensiones de la columna de sedimentación que en la que se experimentará, así como equipar la misma de un agitador, dado que unos autores lo recomiendan y otros no.

Es así que Eckenfelder y Ford, en 1970 en su publicación Control de Contaminación del Aguas; Metcalf & Eddy, 2004, en Ingeniería de aguas Residuales Tratamiento, Vertido y Reutilización; y van Haandel & van der Lubbe, 2012, en Tratamiento Biológico del Agua Residual, concuerdan que la información requerida para obtener los coeficiente de sedimentación zonal, en esta caso las contantes de velocidad, en el proceso de lodos activados, puede ser obtenida de un análisis de sedimentación zonal, con el siguiente proceso:

1. Tomar una cantidad adecuada de licor mezclado del reactor aeróbico, la cual debe ser vertida en la columna de acrílico graduada.
2. Los sólidos de cada prueba deben mezclarse de manera cuidadosa para conseguir homogeneidad y permitir que la sedimentación se lleve a cabo bajo condiciones normales.
3. Desde el momento que se decide empezar la prueba se debe arrancar a su vez un cronómetro.
4. Una vez que la interfase se forme, se debe registrar su posición, en este caso a la altura en que se encuentra, con respecto al tiempo de sedimentación.

5. Repetir este proceso para diferentes concentraciones de licor mezclado.

### 3.5.2. Determinación de las constantes de sedimentación zonal

1. Graficar la posición de la interfase en función del tiempo a varias concentraciones de licor mezclado.
2. Dibujar la recta que mejor se ajuste a través de la parte lineal de cada curva de licor mezclado.
3. Determinar la velocidad de sedimentación zonal de cada recta dibujada como la gradiente de  $\Delta Y/\Delta X$ .

$$VS = \frac{\text{altura } (h)}{\text{tiempo}} \quad (6)$$

4. Dibujar los valores logarítmicos de las velocidades determinadas en función de las concentraciones de licor mezclado, y trazar la recta que mejor se adapte a dichos puntos.
5. Finalmente, con estos elementos, determinar las constantes de la ecuación de Vesilind: k, igual al gradiente de la recta, y  $V_0$ , igual a la intersección de la línea recta en el eje de las abscisas.

$$VSZ = V_0 e^{-kX} \quad (7)$$

Donde:

VSZ = velocidad de sedimentación de zona.

X = concentración de lodos activados.

$V_0$  y k = constantes de sedimentabilidad de los lodos.

6. Una vez determinadas las constantes de sedimentación, se podrá hallar la velocidad de sedimentación zonal para cualquier concentración de lodo deseado en la planta final de Vindobona.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### 4.1. Estudio de sedimentación en la Planta Piloto de Tratamiento de Agua Residual en la descarga del Batán

Para el estudio de sedimentación en las diferentes fases de la Planta piloto de tratamiento de Agua Residual, se realizaron varias pruebas de sedimentación a lo largo de cada una de estas, donde se relacionó los parámetros, alimentación – microorganismos (F/M) y el tiempo de retención celular o edad de lodo, con respecto de la sedimentación.

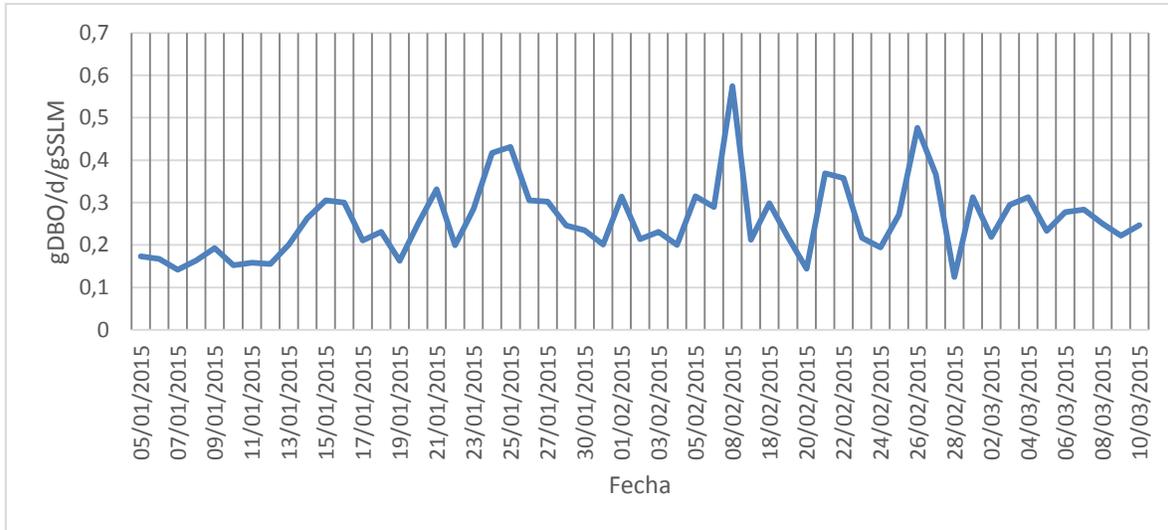
La relación F/M de cada fase se obtuvo utilizando la ecuación 3, donde se empleó los datos de DBO del afluente, el tiempo de retención hidráulico de los reactores aireados y la concentración de sólidos suspendidos volátiles de los reactores aireados, datos que fueron muestreados diariamente.

#### 4.1.1. Relación alimento - microorganismos (F/M)

##### 4.1.1.1. Fase 1 y Fase 2

Para iniciar el estudio de sedimentación en la Planta Piloto de Tratamiento de Agua Residual, es necesario conocer la relación F/M de cada fase. Este parámetro representa la carga orgánica por unidad de masa microbiana en el reactor.

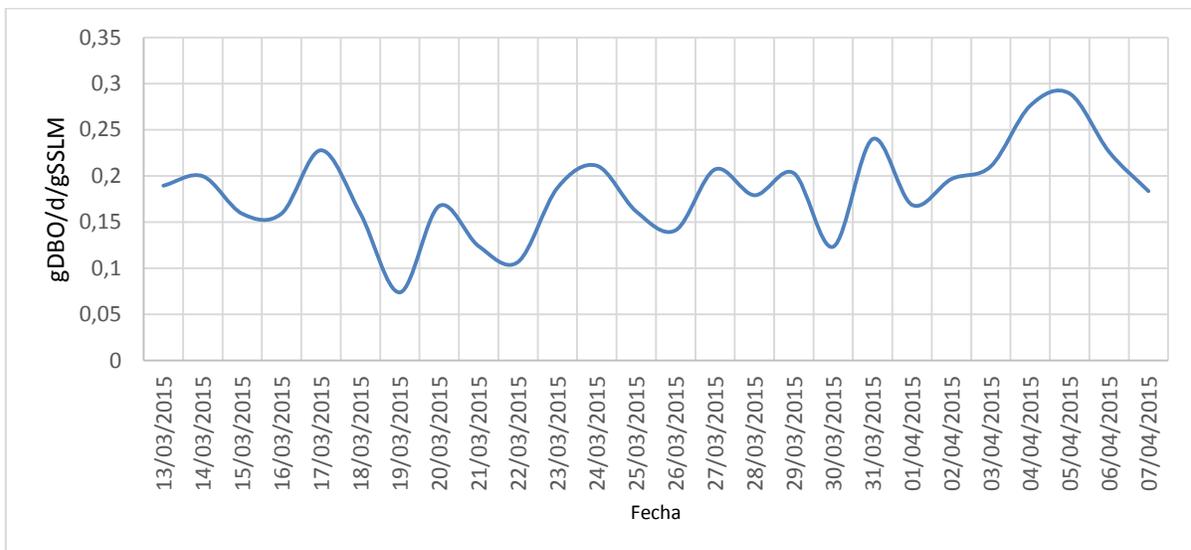
En la figura 5, se presenta la relación F/M de la fase 1, donde se puede observar que la mayoría de valores están entre 0,1 y 0,5 gDBO/d/gSSLM, lo que quiere decir que en esta fase que gran parte del alimento era aprovechado por los microorganismo, por lo cual se esperaba una buena producción de lodos en el reactor.



**Figura 5: Relación F/M de la Fase 1 de la Planta Piloto**

(Elaborado por Mendoza J.)

En la figura 6, está representada la relación F/M de la Fase 2, donde se puede observar que la mayoría de datos se encuentran entre 0,1 y 0,25 gDBO/d/gSSLM, lo que indica que en esta fase en alimento entrante a la Planta Piloto, no abastecía a los organismos existentes en el proceso, por lo cual se esperaba una mala producción de lodos en el reactor.

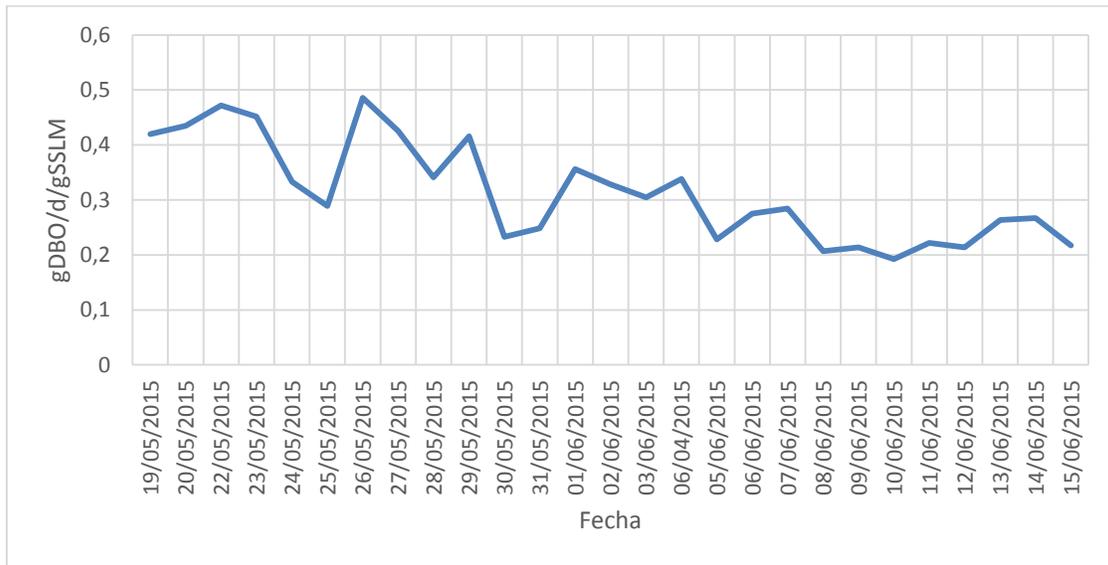


**Figura 6: Relación F/M de la Fase 2 de la Planta Piloto**

(Elaborado por Mendoza J.)

#### 4.1.1.2. Fase 3

Para la figura 7, se muestra la relación F/M de la Fase 3, donde se puede observar que todos los valores están entre 0,2 y 0,5 gDBO/d/gSSLM (muy parecido a la fase 1), lo que quiere decir que en esta fase que gran parte del alimento fue aprovechado por los microorganismos, por lo cual se esperaba una buena producción de lodos en el reactor.



**Figura 7: Relación F/M de la Fase 3 de la Planta Piloto**

(Elaborado por Mendoza J.)

## 4.1.2. Tiempo de retención celular

### 4.1.2.1. Fase 1, 2 y 3

Para determinar el tiempo de retención celular de cada fase, se utilizó los datos muestreados diariamente de sólidos suspendidos volátiles de cada reactor, el volumen de cada reactor, los sólidos suspendidos volátiles del lodo de descarte, y el caudal de lodo descartado o purgado.

Es así que se utilizó la ecuación 5, para obtener los valores del tiempo de retención celular. Con dichos valores y la fecha de cada uno, se realizó la figura 8, donde se observa el tiempo de retención celular, con el que se operó la Planta Piloto, mismo que fue aumentando a través de cada fase. En el mismo gráfico se presentan dos líneas de tiempo de retención celular, la línea azul representa el SRT aireado (solo toma en cuenta el volumen de los reactores aireados) y la línea tomate representa el SRT total (se tomó en cuenta el volumen de todos los reactores del proceso).

Entonces se obtiene que, durante la primera fase, la edad de lodo total con la que operaba la Planta Piloto era, entre 2 a 5 días, en la fase dos el tiempo de retención celular total con el que operó la Planta Piloto fue, de 5 a 12 días, y finalmente para la fase tres la edad de lodo total fue, de 16 a 22 días.

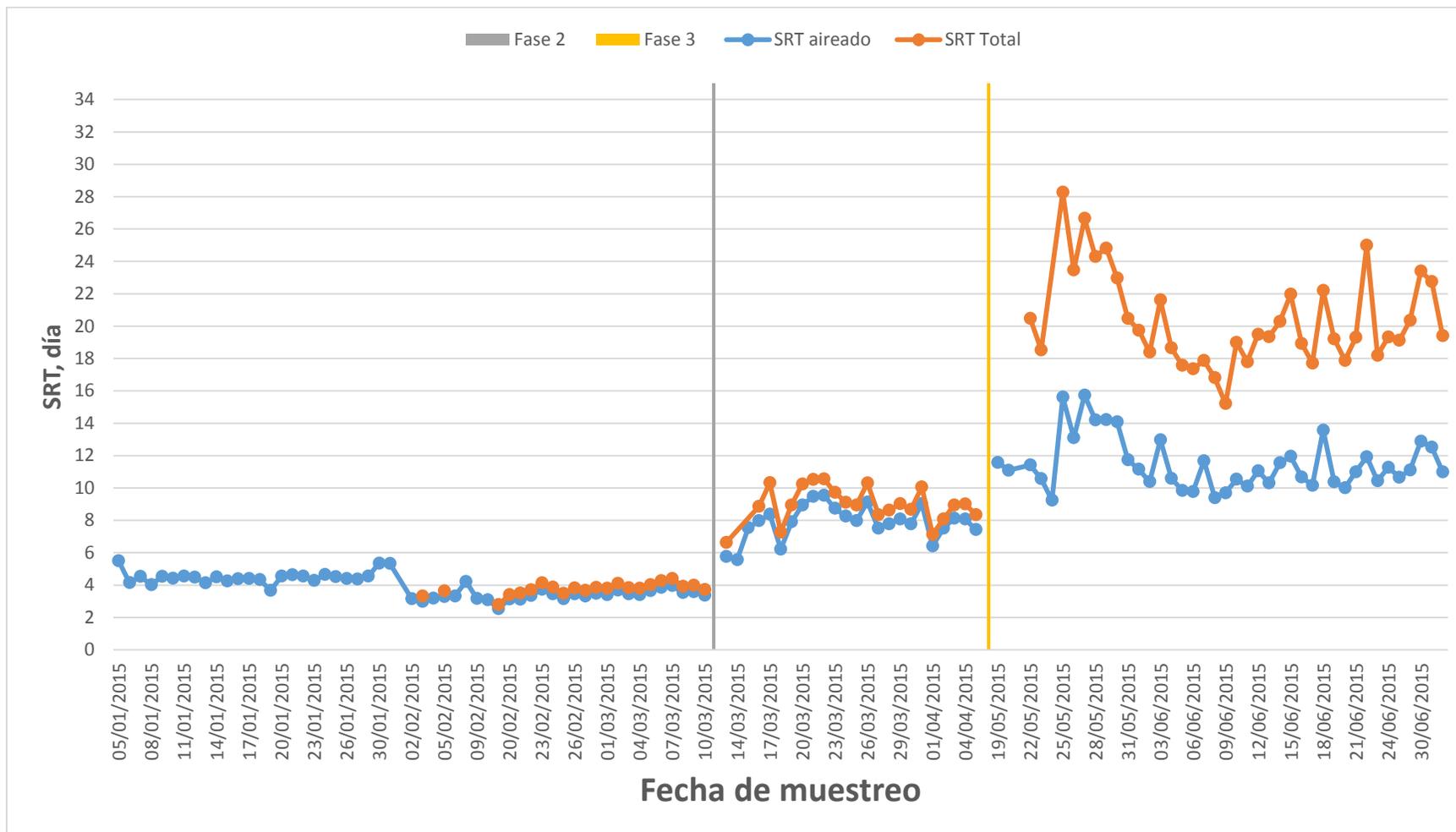


Figura 8: Tiempo de retención celular de todas las fases de la Planta Piloto

(Elaborado por Mendoza J.)

## 4.2. Pruebas de sedimentación a diferentes concentraciones en la Planta Piloto de tratamiento de aguas residuales

Las siguientes pruebas se realizaron a diferentes concentraciones en la columna de sedimentación, los datos se registraron de la siguiente manera: durante la primera media hora se registró la altura de la interfase de lodo durante cada minuto, la siguiente media hora cada cinco minutos, la siguiente cada diez minutos y la última media hora cada quince minutos; resultando, pruebas de sedimentación de 120 minutos (2 horas).

### 4.2.1. Fase 1 y 2

Para estas dos fases se realizaron varias pruebas de sedimentación, siguiendo el procedimiento mencionado anteriormente. Estas pruebas presentaron un comportamiento negativo del lodo, ya que el mismo no tenía una interfase uniforme, existía una parte del lodo que flotaba desde el inicio y después de 15 a 25 minutos el lodo se levantaba. En las figuras 9, 10 y 11 se muestra lo mencionado.



**Figura 9, Figura 10 y Figura 11: Levantamiento de lodos.**

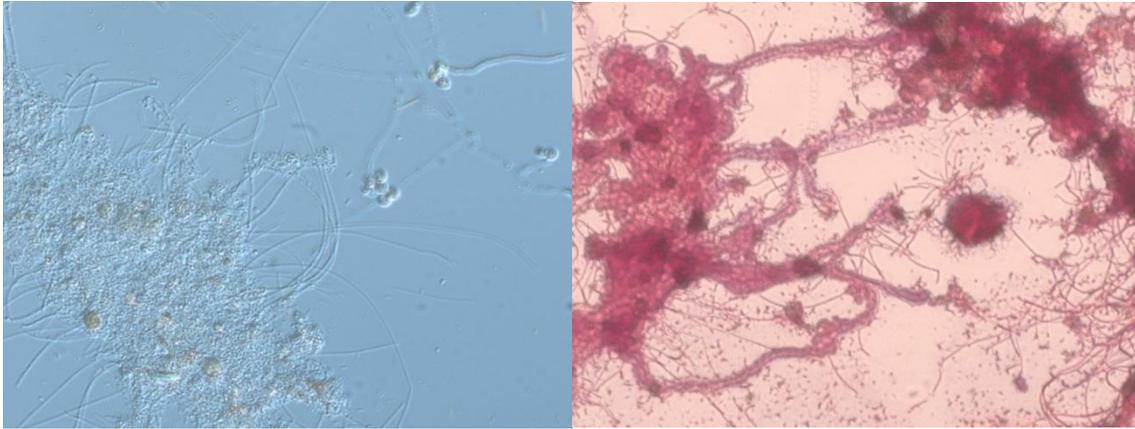
Fotografías tomadas por Mendoza J.

En la Fase 1, a pesar que la relación F/M calculada fue buena, la Planta Piloto operó con tiempos de retención celular entre 2 y 5 días, por lo cual el lodo que circulaba en el proceso era un lodo extremadamente joven. Es decir el lodo que se producía y circulaba, era un lodo liviano con malas condiciones de sedimentación.

Para la Fase 2, los tiempos de retención celular aumentaron entre 5 y 12 días, lo que quiere decir que el lodo que circulaba en el proceso ya no era un lodo tan joven. Pero en esta etapa la relación F/M fue mala, por lo cual la Planta Piloto tuvo un lodo pobre. Por lo tanto, al igual que en la primera fase, las condiciones de sedimentación no eran buenas, ya que el poco lodo producido en los reactores, aún tenía un tiempo de retención celular joven.

Combinado a esto también existió un proceso de desnitrificación, ya que en el lodo sedimentado se generaban las condiciones anóxicas para que los nitratos aún existentes en el proceso se transforme en gas nitrógeno. Esto en conjunto con las condiciones anteriormente mencionadas del lodo (liviano y joven), resultaba en un levantamiento del mismo. Pues al generarse el gas nitrógeno este se aferraba al floc o al lodo y al momento liberarse, lo arrastraba hacia la superficie.

Adicionalmente para complementar el estudio del levantamiento del lodo en estas dos Fases de operación, se realizaron análisis microscópicos, donde se pudo observar y comprobar la presencia de bacterias filamentosas, las cuales causaban un esponjamiento en el lodo, y provocaban que el mismo nunca sedimente sino que se mantenga flotando en la superficie del agua residual tratada. En las figuras 12 y 13, se muestra las bacterias filamentosas observadas bajo el microscopio en los lodos de la Planta Piloto.



**Figura 12 y Figura 13: Bacterias filamentosas observadas bajo el microscopio**

Fuente: Programa de Saneamiento Ambiental.

#### 4.2.2. Fase 3

En la Fase 3, la relación F/M estuvo dentro de los valores que recomienda la literatura, por lo que la materia biológica de los reactores estuvo bien alimentada. El tiempo de retención celular con el que se operó la Planta Piloto fue entre 16 y 22 días, lo que quiere decir que existió un lodo adulto o viejo, lo que ayuda a la aglomeración del floc, presentando mejores características para la sedimentación.

Una vez realizadas las pruebas de sedimentación, se puede evidenciar que el problema de desnitrificación aun persistía, ya que algunas curvas de sedimentación no fueron congruentes con la literatura o presentan un comportamiento totalmente diferente al esperado.

Es así que en la tabla 4-1 y en la figura 14 se presentan todos los datos obtenidos en los ensayos de sedimentación en columna, así como todas las gráficas realizadas a partir de estos datos. Con estas gráficas, se realizó un estudio detallado del comportamiento de la sedimentación de cada prueba, dentro de esto se realiza comparaciones entre las curvas y observaciones independientes.

Posteriormente se presenta la selección de las curvas de las pruebas más adecuadas, con las cuales se trabajó para lograr determinar los coeficientes de velocidad de sedimentación zonal.

Como se mencionó previamente en la tabla 4-1, se presentan todos los datos obtenidos de las pruebas en la columna de sedimentación de la Planta Piloto, de los cuales se registró la altura de la interfase de sedimentación, cada cierto intervalo de tiempo.

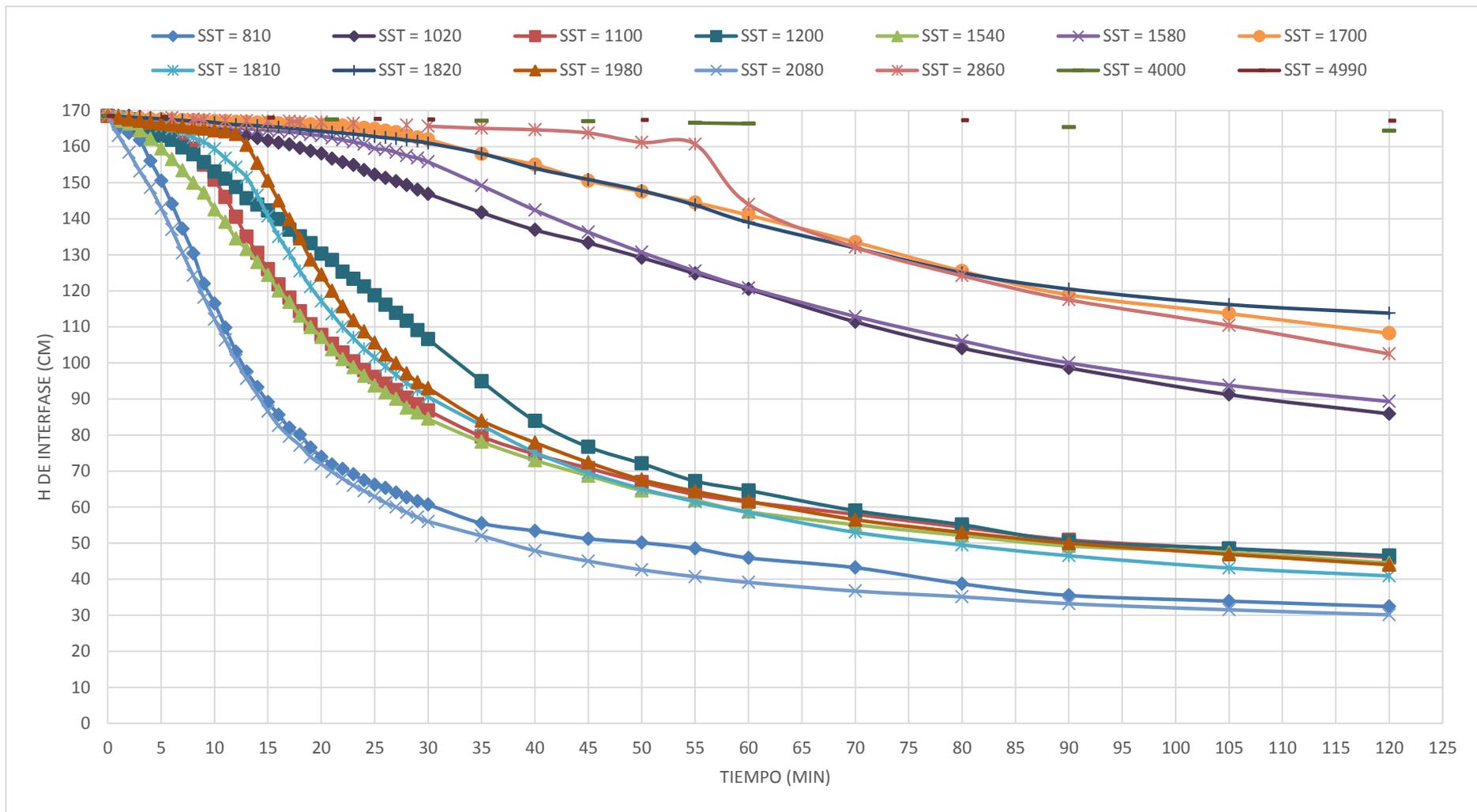
Para la figura 14, se presentan las curvas de sedimentación de cada prueba a diferentes concentraciones de SST, en las cuales se grafica la altura de la interfase de sedimentación registrada en función del tiempo.

**Tabla 8: Datos obtenidos de los ensayos en la columna de sedimentación**

Fecha	26/05/2015	29/04/2015	26/05/2015	27/04/2015	26/05/2015	26/05/2015	06/06/2015	06/06/2015	26/05/2015	13/05/2015	04/05/2015	06/05/2015	10/05/2015	06/06/2015
SST	810	1020	1100	1200	1540	1580	1700	1810	1820	1980	2080	2860	4000	4990
Σ TIEMPO	h Interfase													
min	cm													
0	168,5	168,5	168,5	168,5	168,5	168,5	168,5	168,5	168,5	168,5	168,5	168,5	168,5	168,5
1	165,3	168,5	167,5	168,1	167,2	168	168,2	168	168,3	168	163,1			
2	163,8	168,5	166,5	167,6	166,4	167,5	168	167,4	168,2	167,5	158,4			
3	161,8	168,2	165,5	166	164,5	167,2	167,8	166,9	168	167,2	153,2			
4	156	167,9	164,3	164,5	162,2	167,1	167,7	166,4	167,9	166,7	148,6			
5	150,5	167,6	163,4	163	159,5	166,9	167,6	165,7	167,7	166,4	142,9			168,2
6	144,1	167,4	162,2	161,9	156,5	166,6	167,5	165	167,5	166,1	137	168		
7	137,2	167,1	161,1	159,8	153,4	166,4	167,4	164	167,3	165,6	130,5			
8	130,4	166,4	159,5	157,9	150	166,1	167,3	162,5	167,1	165,3	124,3	167,6		
9	122	165,8	155	155,7	147,2	166	167,2	161,3	167	165	118,2	167,5		
10	116,5	165	150,8	153,1	142,6	165,8	167,1	159,4	166,7	164,5	112,1			
11	109,8	164,4	146	151,1	139,1	165,5	167	156,8	166,4	164,2	106,4	167,3		
12	103,1	163,7	140,5	148,8	134,5	165,2	166,9	154,3	166,1	163,5	100,7			
13	97,6	163	135	145,7	131,6	165	166,8	151,5	166	160,5	95,7	167,2		
14	93,3	162,4	130,5	143,9	128	164,8	166,7	146,5	165,8	155,5	91,3			
15	89,1	161,7	126	142,3	124,4	164,6	166,6	140,7	165,6	150,5	86,6	167,1		168
16	85,6	161,1	121,8	139,9	120,1	164,3	166,5	135	165,4	145	82,6			
17	82	160,6	118,1	136,9	116,9	164,1	166,4	130,4	165,1	139,8	79,6	167		
18	80,1	159,6	114,3	135,1	113,1	163,8	166,3	125,5	164,9	134,5	77,1	166,9		
19	76,5	158,8	110,7	133,2	109,9	163,4	166,2	121,1	164,5	128,7	73,9			
20	73,9	158,1	107,7	130,3	107,2	163	166	117,2	164,3	124,5	71,9	166,8		

Fecha	26/05/2015	29/04/2015	26/05/2015	27/04/2015	26/05/2015	26/05/2015	06/06/2015	06/06/2015	26/05/2015	13/05/2015	04/05/2015	06/05/2015	10/05/2015	06/06/2015
SST	810	1020	1100	1200	1540	1580	1700	1810	1820	1980	2080	2860	4000	4990
Σ TIEMPO	h Interfase													
min	cm													
21	71,8	156,7	105,3	128,5	103,8	162,4	165,9	113,6	164	120	69,8		167,5	
22	70,6	155,7	102,9	125,3	101	161,9	165,8	110	163,8	115,7	67,9			
23	69,1	154,9	100,4	123,3	98,8	161,3	165,5	107	163,5	111,8	66	166,5		
24	67,4	153,5	98	121,2	96,4	160,7	165,2	103,9	163,2	108,7	64,5			
25	66,2	152,2	96,1	118,7	93,7	159,5	164,9	101,5	162,8	105,6	62,9			167,7
26	65,3	151,3	94,2	116,1	91,8	159,2	164,4	99	162,5	102,3	61,2			
27	64	150,4	92,4	113,9	90	158,4	164	96,7	162,2	99,9	60			
28	62,7	149,3	90,3	111,7	87,6	157,5	163	94,4	161,8	97,1	58,5	166		
29	61,6	148,1	88,5	109,1	86,2	156,8	162,5	92,5	161,5	94,6	57,2			
30	60,7	146,9	86,8	106,6	84,5	155,8	162	90,6	161	93	56	165,7		167,5
35	55,5	141,7	79,6	94,9	78,1	149,2	158	82,7	158,1	84	52	165,1	167,2	
40	53,4	136,9	74,7	83,9	73	142,4	155	75,2	154	77,9	47,9	164,7		
45	51,2	133,3	70,8	76,7	68,7	136,3	150,5	69,5	150,9	72,4	45	163,8	167	
50	50,1	129,2	66,9	72,1	64,6	130,7	147,5	65,1	147,8	67,6	42,6	161,2		167,4
55	48,5	124,8	63,5	67,2	61,9	125,5	144,5	61,5	143,8	64,4	40,7	160,7	166,6	
60	45,9	120,5	61,4	64,6	58,7	120,8	141	58,5	139	61,6	39,1	144	166,4	
70	43,2	111,4	58	59	55,1	112,9	133,5	53	131,9	56,5	36,7	132,1		
80	38,7	104,1	54,4	55,1	52,1	106,1	125,5	49,5	125	53	35,1	124,2		167,3
90	35,5	98,6	50,9	50,5	49,2	100	118,9	46,5	120,5	50	33,2	117,5	165,4	
105	33,9	91,2	48,4	48,5	47,4	93,8	113,7	43,1	116,2	46,9	31,5	110,4		
120	32,4	85,9	46	46,5	44,5	89,3	108,2	40,9	113,8	44	30,1	102,5	164,4	167,2

Tabla elaborada por Mendoza J.

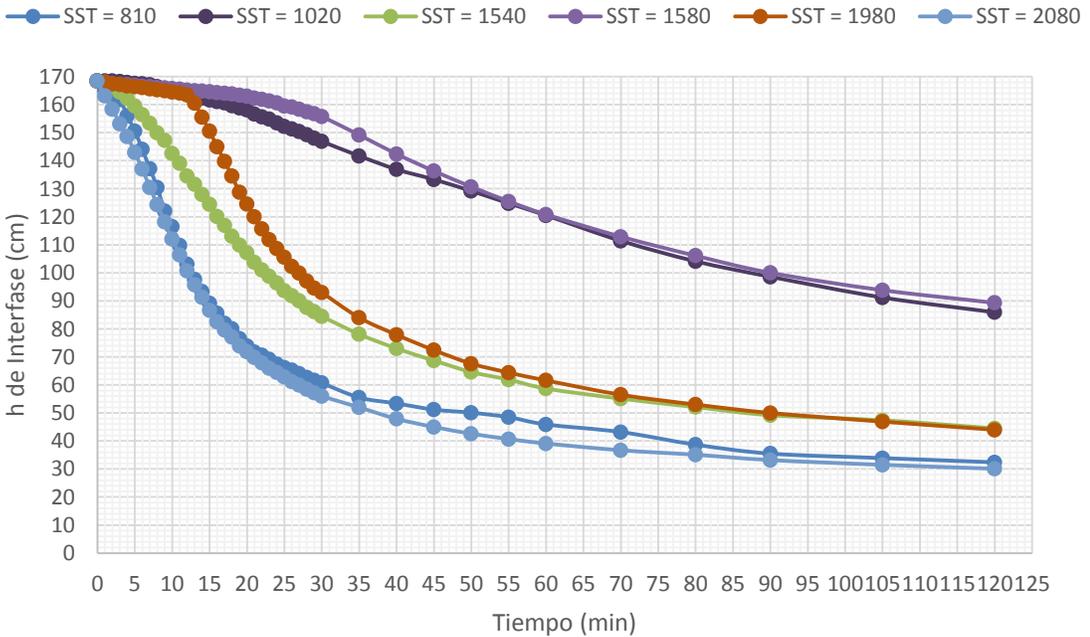


**Figura 14: Curvas de sedimentación, altura (h) de la interfase (cm) en función del tiempo (min)**

(Elaborado por Mendoza J.)

De todas las curvas obtenidas de las pruebas de sedimentación, se obtiene las siguientes observaciones:

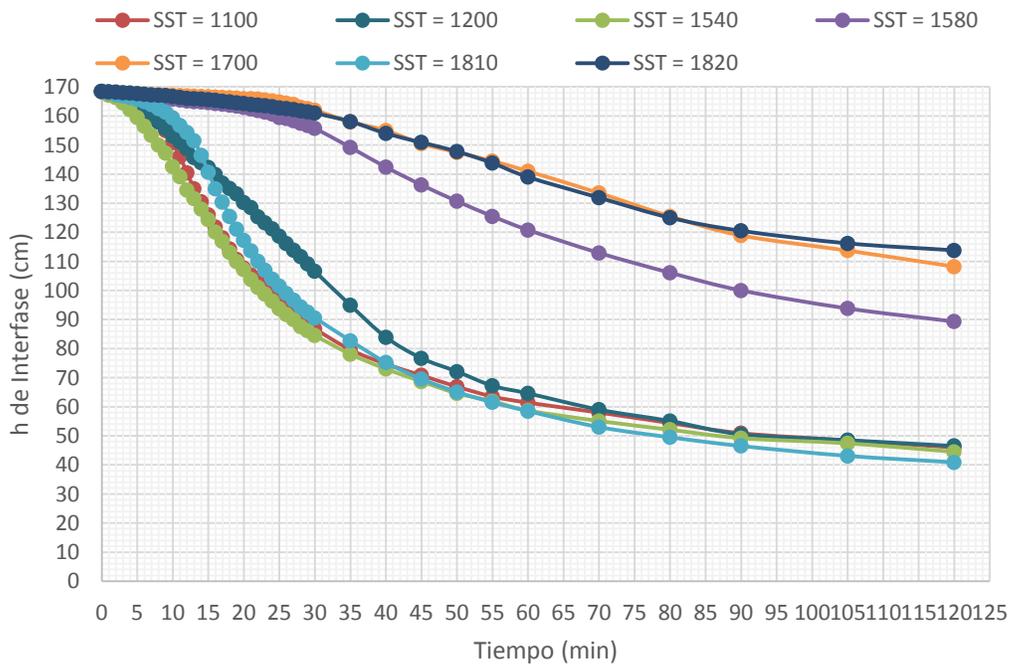
- La figura 15 contiene varias curvas de sedimentación, de las cuales se puede observar que están agrupadas en tres grupos pares. Las curvas inferiores corresponden a las concentraciones de 810 mg/L y 2080 mg/L, las curvas medias corresponde a las concentraciones de 1540 mg/L y 1980 mg/L y finalmente las curvas superiores corresponden a las concentraciones de 1020 mg/L y 1580 mg/L. De estos pares de curvas se observa que tienen la misma tendencia, por lo tanto tienen una velocidad de sedimentación parecida pero a diferente concentración, lo cual contradice la teoría ya que a mayor concentración menor velocidad de sedimentación y a menor concentración mayor velocidad de sedimentación. También de este gráfico se puede observar que las curvas de 1980 mg/L con 2080 mg/L y las de 1540 mg/L con 1580 mg/L, tienen concentraciones de sólidos suspendidos totales muy parecidas pero presentan curvas de sedimentación totalmente distintas.



**Figura 15: Estudio de las curvas de sedimentación con velocidades similares pero con diferentes concentraciones de SST, primer ejemplo**

(Elaborado por Mendoza J.)

- En la figura 16, se puede observar dos conjuntos de curvas, donde las curvas de 1100, 1810, 1540, y 1200 mg/L, tienen una velocidad de sedimentación muy parecida, aun así cuando su concentración es diferente, mismo caso para el resto curvas.

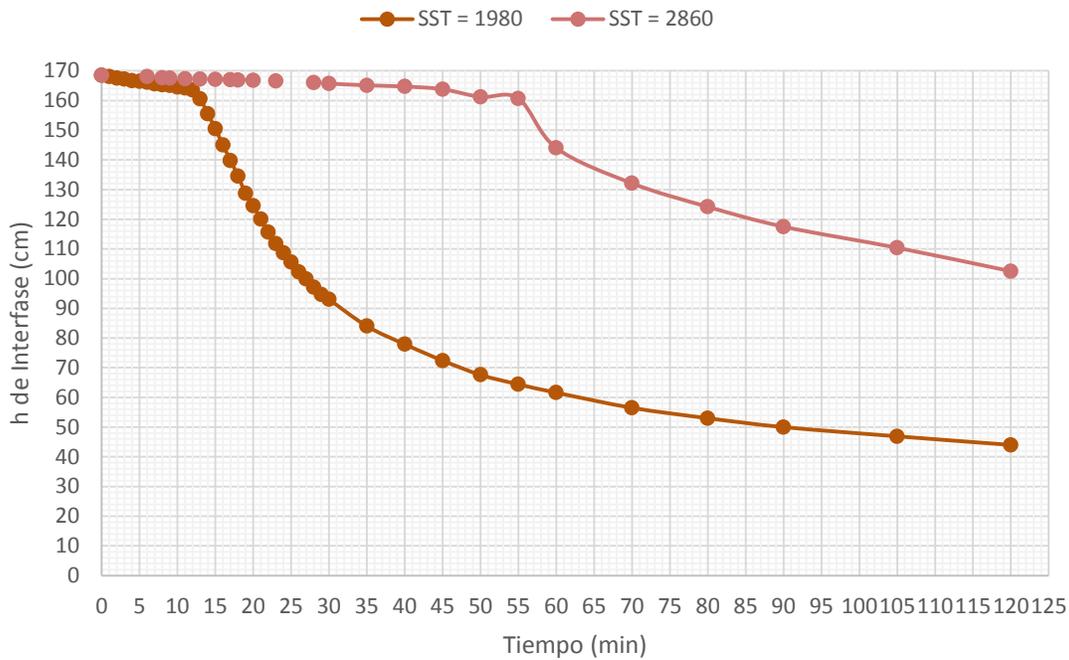


**Figura 16: Estudio de las curvas de sedimentación con velocidades similares para con diferente concentración de SST, segundo ejemplo**

(Elaborado por Mendoza J.)

- Como se observó en las figuras 15 y 16, el comportamiento de los lodos de la Planta Piloto varía constantemente, ya que se observan varias curvas que tienen una velocidad de sedimentación parecida, pero concentraciones de SST totalmente distintas.
- Para la figura 17, se puede observar que en el inicio de la prueba de 1980mg/L, el lodo se mantiene sedimentando lentamente alrededor de 12 minutos, luego de este punto la velocidad de sedimentación aumenta drásticamente. Lo mismo sucede para la concentración de 2860 mg/L, pero de una manera más prolongada. Esto se debe a la presencia de gas

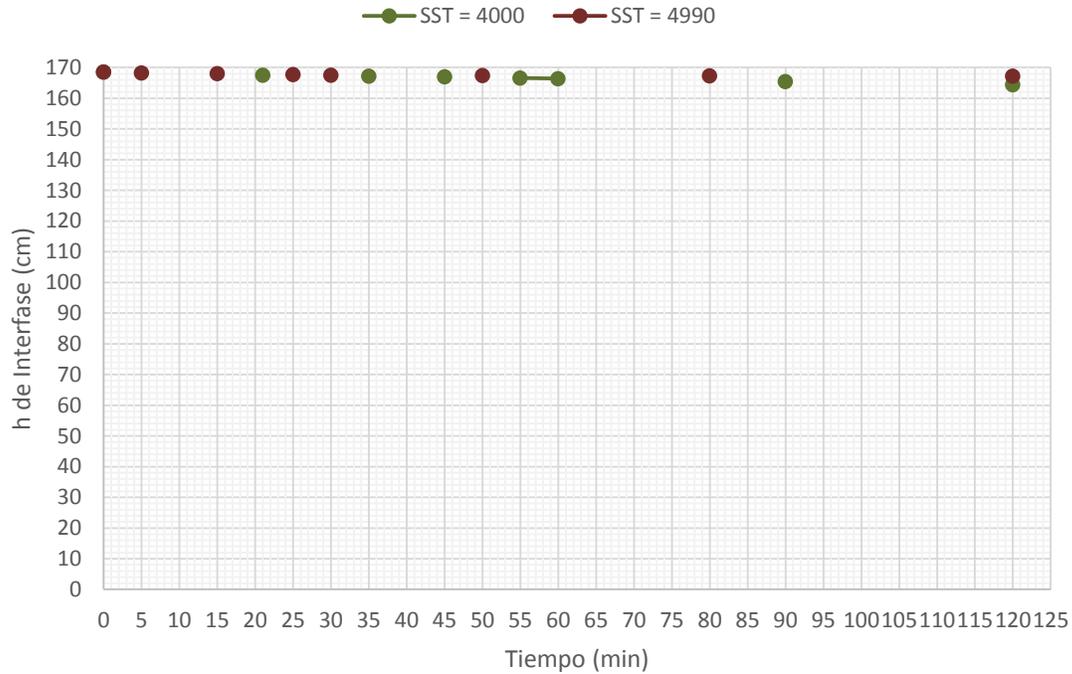
nitrógeno, el cual no permite que el lodo sedimente de manera correcta y una vez que se libera el gas liberar el lodo sedimenta con más libertad, por lo cual su velocidad de sedimentación aumenta. En estos casos el lodo no se flotó debido a que el tiempo de retención celular era mayor, por lo cual el floc era más pesado, debido a la buena producción de lodo, este no estaba abultado. Así que el gas únicamente se liberaba a través del lodo, sin arrastrarlo a la superficie.



**Figura 17: Estudio de curvas de sedimentación con presencia de desnitrificación**

(Elaborado por Mendoza J.)

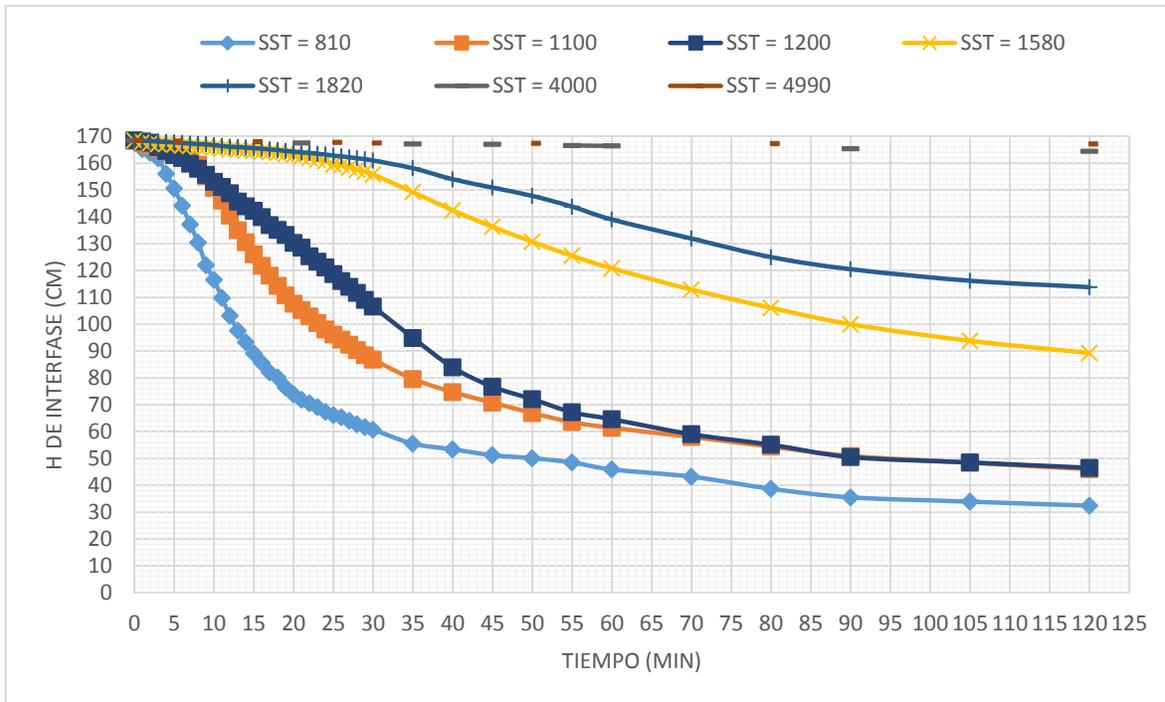
- Finalmente en la figura 18, se observan las curvas con mayor concentración de SST, en las cuales casi no hubo sedimentación, por lo cual casi no existe pendiente en sus curvas. Es así que para la concentración de 4000 mg/L después de haber transcurrido 120 minutos, el lodo solo sedimentó 4 cm, y para la de 4990 después de haber transcurrido el mismo tiempo el lodo solo sedimentó 1 cm. Este comportamiento de sedimentación es correspondiente con la literatura ya que a mayor concentración de sólidos suspendidos totales, menor velocidad de sedimentación.



**Figura 18: Estudio de curvas de sedimentación con altas concentraciones de SST**

(Elaborado por Mendoza J.)

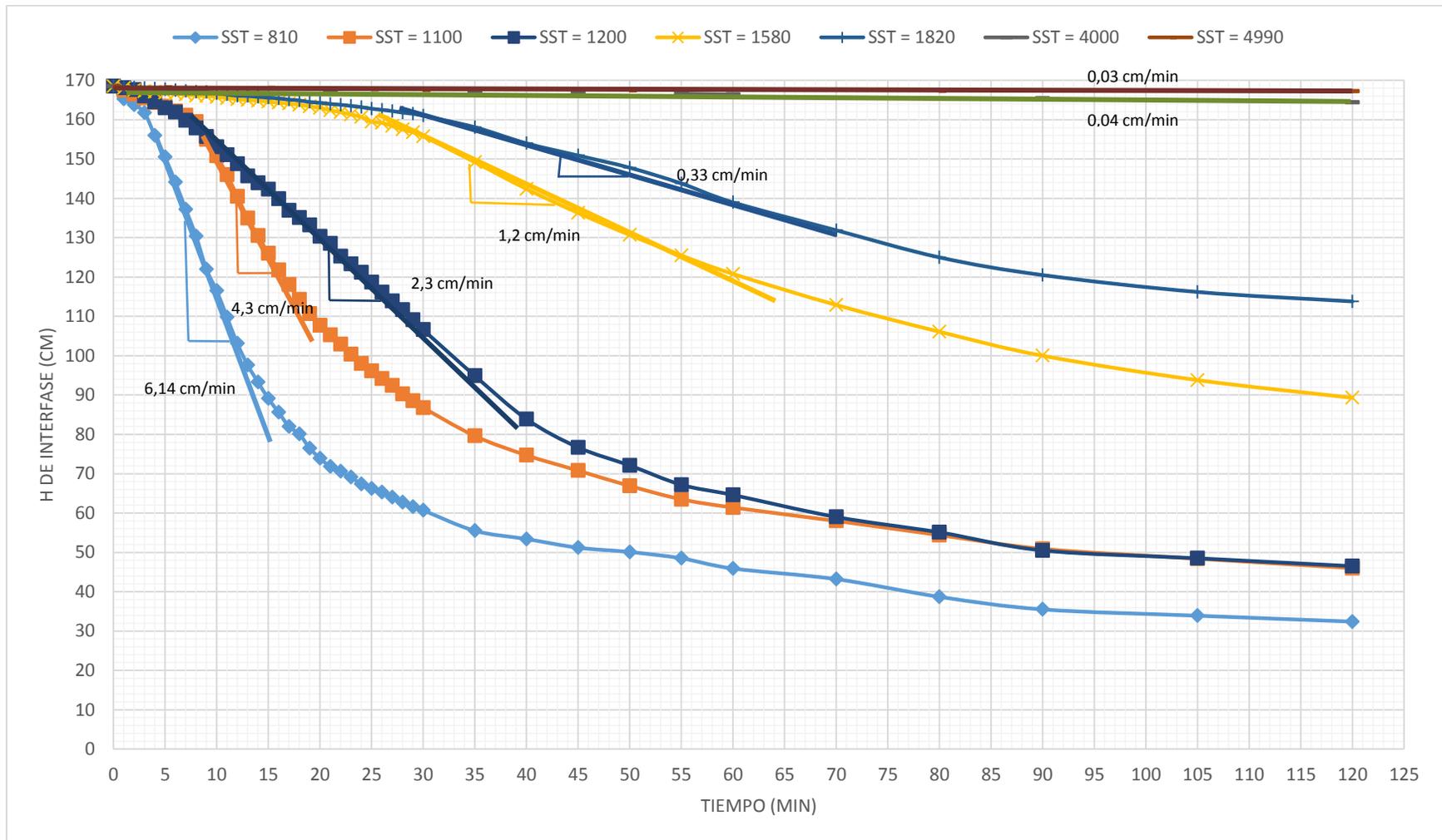
Una vez realizadas todas estas observaciones, se escogió solo siete curvas de las 14 pruebas de sedimentación realizadas, eliminándose aquellas donde se observó los problemas de desnitrificación y las pruebas que no concordaban con la teoría, es decir las que presentaban mayor velocidad de sedimentación con altas concentración de SST o viceversa. Las pruebas o curvas escogidas se presentan en la figura 19.



**Figura 19: Curvas de sedimentación seleccionadas**

(Elaborado por Mendoza J.)

Una vez obtenidas las curvas de sedimentación, se tomó la parte lineal de cada curva para poder obtener las velocidades de sedimentación zonal de cada prueba, con su respectiva concentración de sólidos suspendidos totales. La velocidad es la pendiente  $\Delta Y/\Delta X$  (h interfase/tiempo) (ecuación 6), lo cual está representando en la figura 20 y la tabla 4-2.



**Figura 20: Velocidad de sedimentación zonal**

(Elaborado por Mendoza J.)

**Tabla 9: Velocidad de sedimentación zonal correspondiente a la concentración de SST de cada prueba**

Fecha	Concentración		VSZ
	mg	g	cm/min
26/05/2015	810	0,81	6,14
26/05/2015	1100	1,1	4,3
27/04/2015	1200	1,2	2,3
26/05/2015	1580	1,58	1,2
26/05/2015	1820	1,82	0,33
10/05/2015	4000	4	0,04
06/06/2015	4990	4,99	0,03

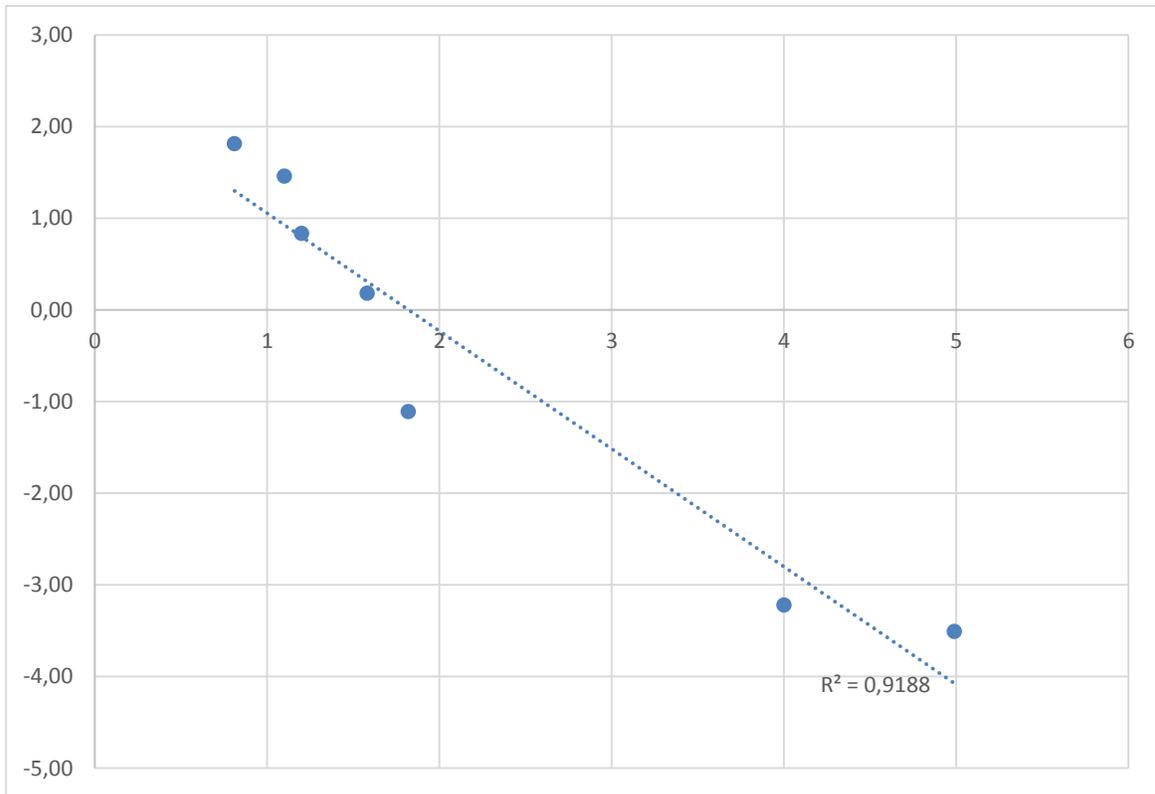
Tabla elaborada por Mendoza J.

Para poder obtener las constantes de velocidad de sedimentación  $k$  y  $V_0$ , de la ecuación 7, ecuación de Vesilind, fue necesario graficar el logaritmo natural de las velocidades obtenidas ( $\ln(VSZ)$ ), en función de sus respectivas concentraciones, las cuales estarán expresadas en gramos por litro. La tabla 4-3 representa dichos valores y en el figura 21, se representan los valores de  $\ln(VSZ)$  en función de sus concentraciones correspondientes, expresadas en g.

**Tabla 10: Cálculos correspondientes, utilizando las concentraciones y la VSZ de cada prueba**

Fecha	Concentración		VSZ	
	mg	g	cm/min	$\ln(\text{cm/min})$
26/05/2015	810	0,81	6,14	1,81
26/05/2015	1100	1,1	4,3	1,46
27/04/2015	1200	1,2	2,3	0,83
26/05/2015	1580	1,58	1,2	0,18
26/05/2015	1820	1,82	0,33	-1,11
10/05/2015	4000	4	0,04	-3,22
06/06/2015	4990	4,99	0,03	-3,51

Tabla elaborada por Mendoza J.



**Figura 21: Velocidad de sedimentación (ln (cm/min)) en función de la concentración de SST (g/l)**

(Elaborado por Mendoza J.)

Con los puntos graficados, se trazó una recta y se obtuvo la ecuación de la misma, donde la gradiente de esta recta representa el coeficiente k y la intersección con el eje Y representa  $V_0$ .

Los valores obtenidos de la gráfica 4-12 tuvieron una correlación  $R = 0.96$  con los cuales se obtuvo las siguientes constantes:

$$k = 1.29$$

$$V_0 = \ln (2.34) \text{ cm/min}$$

$$V_0 = \exp (2.34) \text{ cm/min}$$

$$V_0 = 10,39 \text{ cm/min.}$$

$$V_0 = 6,24 \text{ m/h.}$$

De esta manera finalmente se logró obtener las constantes de velocidad de sedimentación zonal de los lodos, de la ecuación de Vesilind, con las cuales se podrá calcular la velocidad de sedimentación de los lodos activados del agua residual de Quito a cualquier concentración de sólidos suspendidos totales, la ecuación obtenida es la siguiente:

$$VSZ = 6,24e^{-1,29x}$$

Donde, VSZ = velocidad de sedimentaciones zonal, m/h.

6,24 = constante de velocidad de sedimentación, m/h.

1,29 = constante de concentración de SST en los lodos, g/L.

X = concentración de SST de los lodos, que se necesita averiguar su VSZ.

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

- En la Fase 1, a pesar de que los valores de F/M calculados estaban dentro de lo que recomienda la literatura, en esta fase se operó la planta piloto con edades de lodo muy bajas, por lo cual en el proceso circulaba un lodo muy joven. Es por estas dos razones anteriores, que en conjunto con la desnitrificación y las bacterias filamentosas se producía la resuspensión de lodos.
- Para la Fase 2, sucedió lo contrario a la fase uno, las edades de lodo ya eran más altas, pero los valores de F/M calculados estaban bajos y fuera de lo que recomienda la teoría, por lo cual existía un lodo pobre en el proceso. Al igual que en la fase anterior estos dos factores se combinaban con el fenómeno de desnitrificación y bacterias filamentosas, lo que resultaba en la resuspensión de los lodos.
- Finalmente en la Fase 3, ya se logró realizar las pruebas de sedimentación, dado que el tiempo de retención celular era alto y en la relación F/M estaba dentro de lo que recomienda la literatura. Estas pruebas demostraron también, que los lodos tienen un comportamiento que varía día a día, ya que como se observó, existían curvas de sedimentación que poseían velocidades similares, pero la concentración de SST de dichas curvas era totalmente diferente. También se presentó el caso contrario con curvas de sedimentación que presentaban una concentración de SST muy similar, pero su velocidad de sedimentación era muy distinta.
- Con las pruebas de sedimentación seleccionadas finalmente se logró calcular las constantes de velocidad sedimentación zonal, las cuales son 6,24 m/h, constante de velocidad de sedimentación y -1,29 g/L constante de concentración de SST en los lodos. Con estas constantes empleadas en la fórmula de Vesilind, se podrá hallar la velocidad de sedimentación zonal

para cualquier concentración de lodos producidos en el tratamiento biológico de las aguas residuales de Quito.

- Con respecto al método, fue el adecuado ya que finalmente se pudo determinar los coeficientes de velocidad de sedimentación de los lodos. Todos los problemas que existieron, no se presentaron por el método utilizado, sino por las condiciones (ya mencionadas), en las cuales se operó la Planta Piloto.
- Las dimensiones de la columna de sedimentación no presentaron ningún problema, ya que superaban las dimensiones mínimas recomendadas, de la literatura, tanto en diámetro como en altura. Por lo tanto el equipo era el óptimo.

## 5.2. Recomendaciones

- Para poder llevar acabo las pruebas de sedimentación en columna se recomienda operar con edades de lodo mayores a 12 días, ya que se obtiene un lodo viejo, el cual posee un floc más cohesionado y pesado, lo que aporta a una mejor sedimentación.
- En el caso de operar con edades de lodo bajas, es necesario revisar el tamaño de burbuja de los reactores aireados. Ya que esta al ser muy grande, no permitirá que el lodo producido se aglomere de la mejor manera, por lo tanto se obtendrá un lodo abultado con mala calidad de sedimentación.
- Dado que el comportamiento del lodo nunca fue constante a lo largo del tiempo, es necesario realizar por lo menos cuatro pruebas el mismo día, ya que de esta manera la probabilidad de conseguir un comportamiento diferente de los lodos es menor. Así los datos obtenidos serán más representativos para los fines respectivos.

- Se recomienda realizar una caracterización microbiología de los lodos, ya que a lo largo del proceso pueden existir bacterias facultativas nitrificantes y/o desnitrificantes, las cuales son las que producen gas nitrógeno y hacen que el lodo se levante y flote.

## VI. BIBLIOGRAFÍA:

1. Constitución de la República del Ecuador. (2006). Asamblea Constituyente. Montecristi. Ecuador.
2. Contreras, J. (2010). Modelación del Sedimentador Secundario en Planta de Lodos Activados. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago de Chile. Chile.
3. Departamento de Saneamiento Ambiental (PSA). 2015. Fotografías de bacterias. EPMAPS. Quito. Ecuador.
4. Eckenfelder, W., Ford, D. (1970). Water Pollution Control, Experimental procedures for process desing. Jenhins book Publishing CO.
5. Fall, C., Loaiza, J., Esparza, M., Martínez, L. Evaluación de un clarificador secundario en una planta de tratamiento de aguas residuales. Centro Interamericano de Recursos del Agua, UAEMex. Toluca, México.
6. González, S. (2011). Desarrollos tecnológicos para el tratamiento y reúso eficiente de aguas residuales. Coordinación de Ingeniería Ambiental Instituto de Ingeniería. UNAM.
7. Google Earth. (2015). Coordenadas de Ubicación y fotografía.
8. Hazen and Sawyer. (2011). Estudios de Actualización del Plan Maestro Integrado de Agua Potable Y Alcantarillado Para El Distrito Metropolitano de Quito. Empresa Pública Metropolitana de Agua y Saneamiento de Quito (EPMAPS). Quito. Ecuador.
9. Innovagua, S.A. (2012). Historia del Tratamiento de agua. Moravia. Costa Rica.
10. Latinosan. (2007). Saneamiento para el desarrollo. Conferencia latinoamericana de saneamiento. Water and Sanitation Program (WSP). Banco Mundial. Unicef. Banco Interamericano de desarrollo – BID.
11. Lenntech. (1998). Water Treament Solution. Historia del tratamiento de agua potable. Otenido el 22 de Abril del 2015 en <http://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/historia/historia-tratamiento-agua-potable.htm>  
Water Treament Solution. Historia desinfeccion del agua. Obtenido el 22 de

<http://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/historia/historia-desinfeccion-agua.htm>

12. Metcalf & Eddy. (2004). Ingeniería de Aguas Residuales Tratamiento, Vertido y Reutilización. Mc Graw Hill. Cuarta Edición.
13. Resolución 002. (2014). Normas Técnicas de Calidad Ambiental Emisiones y Vertidos. Secretaria de Ambiente. Quito. Ecuador.
14. Romero, J. (2010). Tratamiento de Aguas Residuales, Teoría y principios de diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia.
15. Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente. (2003). Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE). Ecuador.
16. van Haandel A., van der Lubbe, J. (2012). Handbook of Biological Wasterwater Treatment, Desing and Optimisation of Activated Sludge Systems. IWA Publishing. Segunda Edición. London.
17. Zarate, V. (1995). Estudios de Sedimentación de Lodos Secundarios de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales del Estado de Nuevo León. Facultad de Ingenieria Civil. División de Estudios de Postgrado. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterey. México.
18. Ramalho. (2003). Tratamiento de Aguas Residuales. Faculty of Science and Engineering. Laval University. Quebec. Canadá.

## VII. ANEXOS

Anexo A – 1

PORTADA DEL CD

**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK  
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES**

**Trabajo de Fin de Carrera Titulado:**

“Determinación de los coeficientes de sedimentación de los lodos para la Planta de tratamiento de Aguas Residuales de Vindobona”

**Realizado por:**

**JAIME GUSTAVO MENDOZA OLMEDO**

**Director del proyecto:**

**Miguel Martínez- Fresneda Mestre , PhD.**

**Como requisito para la obtención del título de:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**AÑO**

**Quito, 06 de agosto de 2015**

## Anexo A – 2

### Operación de la Planta Piloto

Fechas de Inicio y Final de cada fase

	Inicio	Final
Fase 1	05/01/2015	10/03/2015
Fase 2	13/03/2015	06/04/2015
Fase 3	21/05/2015	02/07/2015

Caudales

Caudales (L/día)	Fase 1	Fase 2	Fase 3
	9000	4500	4500

Volumen de los reactores

Volumen (L)	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Anóxico 1	Anóxico 2	Anóxico 3
	519,6	519,6	519,6	131	558	558

Anexo A – 3

Datos obtenidos del laboratorio

Datos de DBO, SSV y volumen de exceso de lodo.

Estos datos son los resultados de las muestras mandadas a analizar en el laboratorio LC3. Dicho muestreo se llevó a cabo durante la operación de la Planta Piloto.

Fase 1

Fecha	Efluente Primario	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Anóxico 1	Anóxico 2	Anóxico 3	Lodo de Exceso
	DBO	SSV	SSV	SSV	SSV	SSV	SSV	Volumen
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	L/d
05/01/2015	187	2540	2040	1660	ND	ND	ND	375,1
06/01/2015	172	2420	1920	1600	ND	ND	ND	457,25
07/01/2015	139,6	2380	1840	1480	ND	ND	ND	454,6
08/01/2015	166,1	2380	1880	1600	ND	ND	ND	486,97
09/01/2015	193,1	2300	1920	1560	ND	ND	ND	436,39
10/01/2015	170	2580	2100	1780	ND	ND	ND	438,94
11/01/2015	155	2320	1820	1520	ND	ND	ND	439,59
12/01/2015	145	2200	1740	1460	ND	ND	ND	438,71
13/01/2015	158,91	1880	1340	1340	ND	ND	ND	439,82
14/01/2015	203,3	1820	1440	1200	ND	ND	ND	439,59
15/01/2015	209,2	1520	1280	1160	ND	ND	ND	437,17
16/01/2015	238,8	1780	1520	1300	ND	ND	ND	436,51
17/01/2015	176,2	1880	1600	1340	ND	ND	ND	433,59
18/01/2015	215,4	2100	1720	1560	ND	ND	ND	430,54
19/01/2015	129,2	1580	1460	1540	ND	ND	ND	416,43
20/01/2015	178,9	1640	1360	1120	ND	ND	ND	436,29
21/01/2015	274,4	1920	1540	1320	ND	ND	ND	429
22/01/2015	156,9	1840	1460	1240	ND	ND	ND	430,56
23/01/2015	167,8	1360	1060	980	ND	ND	ND	426,58
24/01/2015	212,9	1140	990	820	ND	ND	ND	430,1
25/01/2015	212,9	1100	970	780	ND	ND	ND	429,22
26/01/2015	114,6	830	710	630	ND	ND	ND	428,56
27/01/2015	173,7	1320	1060	940	ND	ND	ND	430,04
28/01/2015	168,9	1570	1280	1120	ND	ND	ND	424,15
30/01/2015	183,1	1900	1460	1140	ND	ND	ND	385,81
31/01/2015	136,3	1720	1190	1010	ND	ND	ND	392,65
01/02/2015	256,4	2000	1530	1180	ND	ND	ND	ND
02/02/2015	159,3	1810	1390	1110	ND	ND	ND	648,11
03/02/2015	161,8	1660	1280	1110	2140	ND	ND	615,91

Anexo A – 3

Datos obtenidos del laboratorio

Fecha	Efluente Primario	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Anóxico 1	Anóxico 2	Anóxico 3	Lodo de Exceso
	DBO	SSV	SSV	SSV	SSV	SSV	SSV	Volumen
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	L/d
04/02/2015	144,4	1740	1330	1090	ND	ND	ND	628,42
05/02/2015	270,3	2090	1590	1280	2480	ND	ND	626,94
06/02/2015	259,5	2200	1620	1360	ND	ND	ND	621,42
08/02/2015	166,2	840	460	370	ND	ND	ND	605,76
09/02/2015	104,3	1070	980	790	ND	ND	ND	626,94
18/02/2015	178,5	1360	1130	960	ND	ND	ND	620,05
19/02/2015	157,8	1530	1240	1390	1790	ND	ND	617,9
20/02/2015	63,2	1000	820	720	950	ND	ND	619
21/02/2015	182,7	1100	950	810	1630	ND	ND	608,19
22/02/2015	241	1590	1250	1050	1760	ND	ND	584,39
23/02/2015	146,4	1610	1250	1040	1860	ND	ND	549,24
24/02/2015	119,8	1430	1170	960	1940	ND	ND	567,32
25/02/2015	128,9	1060	880	800	1350	ND	ND	570,62
26/02/2015	245	1200	970	800	1380	ND	ND	571,13
27/02/2015	189	1200	960	820	1370	ND	ND	575,31
28/02/2015	72,9	1360	1100	930	1570	ND	ND	577,51
01/03/2015	175,6	1260	1100	880	1550	ND	ND	579,51
02/03/2015	134,5	1480	1150	910	1790	ND	ND	570,78
03/03/2015	169,3	1380	1060	880	1840	ND	ND	576,86
04/03/2015	184,2	1410	1080	910	1800	ND	ND	573,99
05/03/2015	160,9	1670	1270	1040	1890	ND	ND	574,43
06/03/2015	200,2	1790	1320	1050	2290	ND	ND	547,57
07/03/2015	213,9	1860	1360	1140	2290	ND	ND	517,57
08/03/2015	198	1920	1430	1220	2370	ND	ND	574,43
09/03/2015	183,5	2100	1470	1200	2600	ND	ND	574,65
10/03/2015	188,8	1840	1380	1200	2160	ND	ND	580,62

Anexo A – 3

Datos obtenidos del laboratorio

Fase 2

Fecha	Efluente Primario	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Anóxico 1	Anóxico 2	Anóxico 3	Lodo de Exceso
	DBO	SSV	SSV	SSV	SSV	SSV	SSV	Volumen
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	L/d
13/03/2015	186,1	1600	1200	980	2639	ND	ND	358,37
14/03/2015	192,5	1520	1220	970	ND	ND	ND	362,38
15/03/2015	149,6	1450	1160	1010	ND	ND	ND	258,16
16/03/2015	142,8	1490	1130	830	1590	ND	ND	281,85
17/03/2015	168,1	1330	890	620	2680	ND	ND	292
18/03/2015	65	570	520	480	1090	ND	ND	278,1
19/03/2015	50,3	1170	820	630	1560	ND	ND	280,75
20/03/2015	110,1	1040	880	610	1600	ND	ND	248,37
21/03/2015	75,4	1060	760	520	1490	ND	ND	249,15
22/03/2015	83	1300	970	720	1410	ND	ND	251,19
23/03/2015	154,1	1310	960	900	1570	ND	ND	223,83
24/03/2015	189,2	1480	1090	880	1650	ND	ND	257,59
25/03/2015	145,2	1410	1110	940	2010	ND	ND	254,28
26/03/2015	106	1150	1010	730	1740	ND	ND	253,17
27/03/2015	141,5	1070	830	730	1270	ND	ND	256,27
28/03/2015	128,9	1140	870	760	1370	ND	ND	254,93
29/03/2015	131,3	990	880	620	1400	ND	ND	253,78
30/03/2015	67,3	900	620	580	1100	ND	ND	260,68
31/03/2015	133,4	880	700	560	1120	ND	ND	236,84
01/04/2015	114,4	1100	840	670	1330	ND	ND	328,18
02/04/2015	130,8	1080	840	640	850	ND	ND	289,58
03/04/2015	135,6	1030	820	630	1110	ND	ND	261,34
04/04/2015	167,9	1010	740	590	1220	ND	ND	257,37
05/04/2015	139	940	320	590	1180	ND	ND	284,51
06/04/2015	112,8	830	630	460	900	ND	ND	ND

Anexo A – 3

Datos obtenidos del laboratorio

Fase 3

Fecha	Efluente Primario	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Anóxico 1	Anóxico 2	Anóxico 3	Lodo de Exceso
	DBO	SSV	SSV	SSV	SSV	SSV	SSV	Volumen
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	L/d
21/05/2015	204,6	ND	ND	ND	2350	640	2670	176,13
22/05/2015	205	1600	1170	990	1890	1460	1260	172,83
23/05/2015	201,2	1560	1170	1130	1820	1510	1230	167,97
24/05/2015	141,95	1030	1440	1220	ND	ND	ND	170,18
25/05/2015	100,1	1290	990	720	1540	1240	960	138,63
26/05/2015	162,7	1100	970	830	1380	1090	830	138,63
27/05/2015	158,7	1370	1130	730	1650	1210	790	146,13
28/05/2015	141,1	1460	1190	930	1610	1410	940	140,84
29/05/2015	229,5	1960	1610	1210	2180	1660	1450	144,37
30/05/2015	132,4	2130	1550	1250	2510	1160	1410	145,48
31/05/2015	153,4	2150	1710	1490	2570	1820	1600	158,93
01/06/2015	153,5	1560	1200	970	2210	1500	1400	179,23
02/06/2015	202,3	2100	1750	1490	2890	1900	1700	179,23
03/06/2015	195,6	2770	1510	1280	2990	1950	1510	173,93
06/04/2015	185	1730	1690	1320	1840	1790	1790	176,14
05/06/2015	154,8	2330	1790	1750	2530	2030	1950	177,02
06/06/2015	201,7	2310	2120	1920	2460	2260	1960	175,92
07/06/2015	142,3	2070	1170	1090	1230	1010	970	176,79
08/06/2015	158,3	2410	2140	2070	2860	2510	2050	176,79
09/06/2015	147,5	2200	1960	1810	2600	1930	930	176,79
10/06/2015	145,4	2550	2140	1860	3000	2650	2250	173,71
11/06/2015	161,2	2429	2060	1800	3230	2490	2110	179,66
12/06/2015	154,4	2310	2020	1930	2640	2610	2080	152,44
13/06/2015	152,8	1860	1700	1460	2440	2520	2060	173,27
14/06/2015	179	2240	1950	1610	2870	2370	2090	162,02
15/06/2015	140,1	2200	1930	1450	2530	2830	2110	167,31
16/06/2015	251,1	2310	1900	1650	3410	2680	2210	172,82
17/06/2015	173,4	2330	2150	1780	2840	2260	2130	179,89
18/06/2015	194,1	2450	2136	1380	2690	2460	1030	165,54
19/06/2015	150,9	1960	1540	1390	2580	2200	1930	176,14
20/06/2015	163,3	2030	1980	1740	2930	2340	2000	171,5
21/06/2015	174,3	2080	1670	1430	2160	2030	1670	171,22
22/06/2015	189,6	2150	1790	1360	2540	4130	1790	169,8
23/06/2015	200,4	2190	1750	1630	2590	2010	1820	170,18
24/06/2015	163,6	2150	1720	1410	2040	1760	1440	172,61

Anexo A – 3

Datos obtenidos del laboratorio

Fecha	Efluente Primario	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Anóxico 1	Anóxico 2	Anóxico 3	Lodo de Exceso
	DBO	SSV	SSV	SSV	SSV	SSV	SSV	Volumen
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	L/d
25/06/2015	173,6	2150	1790	1490	2320	2010	1580	177,68
26/06/2015	162,2	1770	1400	1160	1670	2170	1470	174,6
30/06/2015	164,5	1850	1420	1210	1940	2260	1350	149,22
01/07/2015	132,2	1890	1480	1170	2350	2030	1480	161,14
02/07/2015	145,4	1560	1430	1220	1360	1770	1340	163,12

Calculo del tiempo de retención celular y la relación F/M

Fase 1

Fecha	F/M	SRT Aireado	SRT Total
	gDBO/d/gSSLM	días	días
05/01/2015	0,17	5,21	ND
06/01/2015	0,17	4,22	ND
07/01/2015	0,14	4,40	ND
08/01/2015	0,16	3,91	ND
09/01/2015	0,19	4,41	ND
10/01/2015	0,15	4,30	ND
11/01/2015	0,16	4,40	ND
12/01/2015	0,16	4,38	ND
13/01/2015	0,20	4,02	ND
14/01/2015	0,26	4,39	ND
15/01/2015	0,31	4,06	ND
16/01/2015	0,30	4,21	ND
17/01/2015	0,21	4,31	ND
18/01/2015	0,23	4,16	ND
19/01/2015	0,16	3,71	ND
20/01/2015	0,25	4,38	ND
21/01/2015	0,33	4,39	ND
22/01/2015	0,20	4,42	ND
23/01/2015	0,28	4,23	ND
24/01/2015	0,42	4,35	ND
25/01/2015	0,43	4,42	ND
26/01/2015	0,30	4,18	ND
27/01/2015	0,30	4,27	ND

Anexo A – 3

Datos obtenidos del laboratorio

Fecha	F/M	SRT Aireado	SRT Total
	gDBO/d/gSSLM	días	días
28/01/2015	0,25	4,34	ND
30/01/2015	0,23	5,32	ND
31/01/2015	0,20	5,14	ND
01/02/2015	0,31	ND	ND
02/02/2015	0,21	3,11	ND
03/02/2015	0,23	3,08	3,49
04/02/2015	0,20	3,16	ND
05/02/2015	0,31	3,21	3,62
06/02/2015	0,29	3,18	ND
08/02/2015	0,57	3,87	ND
09/02/2015	0,21	2,98	ND
18/02/2015	0,30	3,01	ND
19/02/2015	0,22	2,52	2,79
20/02/2015	0,14	2,96	3,24
21/02/2015	0,37	3,02	3,45
22/02/2015	0,36	3,29	3,67
23/02/2015	0,22	3,55	3,97
24/02/2015	0,19	3,40	3,86
25/02/2015	0,27	3,12	3,51
26/02/2015	0,48	3,38	3,77
27/02/2015	0,37	3,28	3,66
28/02/2015	0,12	3,28	3,66
01/03/2015	0,31	3,30	3,70
02/03/2015	0,22	3,54	3,99
03/03/2015	0,29	3,40	3,87
04/03/2015	0,31	3,38	3,83
05/03/2015	0,23	3,46	3,88
06/03/2015	0,28	3,76	4,28
07/03/2015	0,28	3,84	4,35
08/03/2015	0,25	3,39	3,83
09/03/2015	0,22	3,59	4,09
10/03/2015	0,25	3,30	3,70

Fase 2

Anexo A – 3

Datos obtenidos del laboratorio

Fecha	F/M	SRT Aireado	SRT Total
	gDBO/d/gSSLM	días	Días
13/03/2015	0,19	5,59	6,58
14/03/2015	0,20	5,48	ND
15/03/2015	0,16	7,21	ND
16/03/2015	0,16	7,66	8,55
17/03/2015	0,23	8,15	10,09
18/03/2015	0,16	6,11	7,18
19/03/2015	0,07	7,70	8,85
20/03/2015	0,17	8,68	10,06
21/03/2015	0,12	9,38	10,89
22/03/2015	0,11	8,59	9,61
23/03/2015	0,19	8,18	9,20
24/03/2015	0,21	7,91	8,86
25/03/2015	0,16	7,52	8,62
26/03/2015	0,14	8,13	9,36
27/03/2015	0,21	7,30	8,19
28/03/2015	0,18	7,43	8,36
29/03/2015	0,20	8,22	9,39
30/03/2015	0,12	7,22	8,17
31/03/2015	0,24	8,38	9,49
01/04/2015	0,17	6,17	6,96
02/04/2015	0,20	7,18	7,78
03/04/2015	0,21	7,83	8,71
04/04/2015	0,28	8,01	9,06
05/04/2015	0,29	5,73	6,65
06/04/2015	0,23	ND	ND

Fase 3

Fecha	F/M	SRT Aireado	SRT Total
	gDBO/d/gSSLM	días	Días
21/05/2015	ND	ND	ND
22/05/2015	0,47	11,42	21,74
23/05/2015	0,45	10,57	19,88
24/05/2015	0,33	9,23	#¡VALOR!
25/05/2015	0,29	15,62	29,94

Anexo A – 3

Datos obtenidos del laboratorio

Fecha	F/M	SRT Aireado	SRT Total
	gDBO/d/gSSLM	días	Días
26/05/2015	0,49	13,10	23,98
27/05/2015	0,43	15,73	28,22
28/05/2015	0,34	14,20	25,82
29/05/2015	0,42	14,22	25,79
30/05/2015	0,23	14,09	23,78
31/05/2015	0,25	11,74	21,22
01/06/2015	0,36	11,15	22,12
02/06/2015	0,33	10,39	19,33
03/06/2015	0,30	12,98	23,41
06/04/2015	0,34	10,59	20,22
05/06/2015	0,23	9,85	18,08
06/06/2015	0,28	9,77	17,69
07/06/2015	0,28	11,68	18,25
08/06/2015	0,21	9,40	17,38
09/06/2015	0,21	9,69	15,75
10/06/2015	0,19	10,53	20,21
11/06/2015	0,22	10,10	19,35
12/06/2015	0,21	11,06	21,13
13/06/2015	0,26	10,31	21,68
14/06/2015	0,27	11,55	22,54
15/06/2015	0,22	11,95	24,68
16/06/2015	0,37	10,68	21,81
17/06/2015	0,24	10,16	18,97
18/06/2015	0,28	13,57	23,64
19/06/2015	0,27	10,38	21,17
20/06/2015	0,25	10,01	19,41
21/06/2015	0,29	10,99	20,58
22/06/2015	0,31	11,93	27,67
23/06/2015	0,31	10,43	19,36
24/06/2015	0,27	11,27	19,71
25/06/2015	0,28	10,66	19,37
26/06/2015	0,32	11,11	22,22
30/06/2015	0,32	12,89	25,46
01/07/2015	0,25	12,51	24,53
02/07/2015	0,30	10,99	20,61

FOTOGRAFÍAS

Muestreo

El muestreo en la planta piloto se realizaba diariamente, de 9 a 10 de la mañana. Todas las muestras recogidas se preservaban en frío e inmediatamente eran enviadas al laboratorio.



**Fotografía B- 2: muestreadores automáticos**



**Fotografía B- 3: botella del muestreador refrigerada**



**Fotografía B- 1: Muestras en refrigeración a ser enviadas al L3C**

FOTOGRAFIAS

Pruebas de Sedimentación

Fase 1



**Fotografía B- 4:**  
Prueba de sedimentación en columna



**Fotografía B- 6:**  
Levantamiento de lodos



**Fotografía B- 5:** Lodo en resuspensión después de dos horas transcurridas

Anexo B

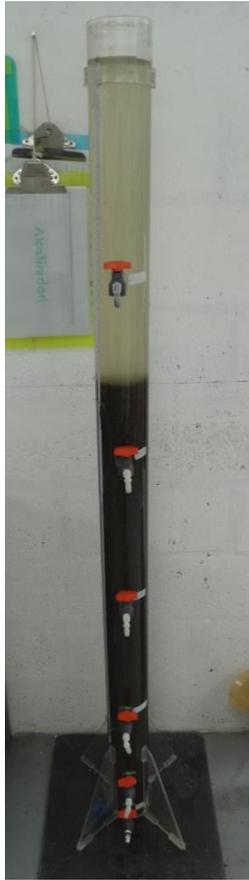
FOTOGRAFIAS



**Fotografía B- 7: Lodo en  
suspensión**

FOTOGRAFÍAS

Fase 2



**Fotografía B- 8: Prueba de sedimentación en columna, fase 2**



**Fotografía B- 9: Levantamiento de lodos, fase 2**



**Fotografía B- 10: Interfase de sedimentación, fase 2**

FOTOGRAFÍAS

Fase 3



**Fotografía B- 11: Prueba de sedimentación en columna fase 3**



**Fotografía B- 12: Interfase de sedimentación de la fase 3**

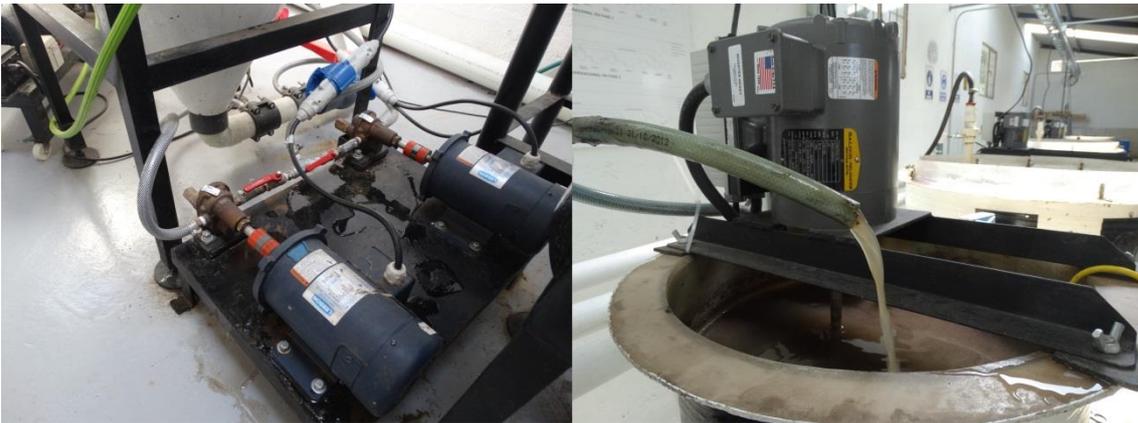
Anexo B

FOTOGRAFIAS

Reactores aireados y retorno de lodos en la planta piloto.



Fotografía B- 13: Reactores aireados de la planta piloto



Fotografía B- 14: Bombas de recirculación y final de la manguera de recirculación