

**ANÁLISIS OPERATIVO DEL PROCESO DE REMOCIÓN DE MATERIA  
ORGANICA POR LODOS ACTIVADOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES DE LA UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA - CAMPUS  
CAJICÁ, UTILIZANDO EL SOFTWARE LIBRE ASM1.**

**ANA MERCEDES VALLEJO SANTACRUZ  
EDWARD MESÍAS CASAS GARCÍA**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS  
BOGOTÁ D.C – 2018**

**ANÁLISIS OPERATIVO DEL PROCESO DE REMOCIÓN DE MATERIA  
ORGANICA POR LODOS ACTIVADOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES DE LA UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA - CAMPUS  
CAJICÁ UTILIZANDO EL SOFTWARE LIBRE ASMI.**

**ANA MERCEDES VALLEJO SANTACRUZ  
EDWARD MESÍAS CASAS GARCÍA**

**Trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos.**

**ASESOR: FELIPE SANTAMARIA ALZATE  
INGENIERO SANITARIO.**

**COASESOR: ADELA TATIANA RODRIGUEZ  
INGENIERA CIVIL, MSC, PHD.**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS  
BOGOTÁ D.C – 2018**



## Atribución 2.5 Colombia (CC BY 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución 2.5 Colombia (CC BY 2.5)**  
Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by/2.5/co/>

### Usted es libre de:

- Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
- hacer obras derivadas
- hacer un uso comercial de esta obra



### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).

Nota de aceptación

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Bogotá D.C., 26 de Noviembre de 2018.

## Dedicatoria

A mi familia, dueños de mi tiempo y mi vida. *AMVS*

## Agradecimientos

A la Universidad Católica de Colombia por su dirección en el desarrollo y la coordinación de la Especialización en Recursos Hídricos.

Al Ingeniero Felipe Santamaria por su tiempo, apoyo y colaboración con el desarrollo de este proyecto de grado.

A la Universidad Militar Nueva Granada y a la Ingeniera Adela Tatiana Rodríguez por su apoyo y aporte del conocimiento en este proyecto de grado.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>1 GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO .....</b>	<b>13</b>
1.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.....	13
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
1.2.1 <i>Antecedentes del problema</i> .....	13
1.2.2 <i>Pregunta de investigación</i> .....	14
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	14
1.4 OBJETIVOS .....	16
1.4.1 <i>Objetivo general</i> .....	16
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	16
<b>2 MARCOS DE REFERENCIA.....</b>	<b>17</b>
2.1 MARCO CONCEPTUAL .....	17
2.2 MARCO GEOGRÁFICO.....	25
<b>3 METODOLOGÍA.....</b>	<b>27</b>
3.1 FASES DEL TRABAJO DE GRADO .....	27
3.1.1 <i>FASE I:</i> .....	27
3.2 INSTRUMENTOS O HERRAMIENTAS UTILIZADAS .....	34
<b>4 ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>36</b>
<b>5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>48</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>50</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 2-3.</b> COMPOSICIÓN DE LOS SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN TOTALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	23
FIGURA 2-1. LOCALIZACIÓN DE LA PTAR EN EL CAMPUS CAJICÁ UMNG. FUENTE: GOOGLE EARTH.....	25
FIGURA 2-2. PROCESO DE TRATAMIENTO PTAR UMNG. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	26
<b>FIGURA 3-1.</b> COEFICIENTES ESTEQUIOMÉTRICOS Y CINÉTICOS DE CALIBRACIÓN. FUENTE: SOFTWARE ASM-1.....	28
<b>FIGURA 3-2.</b> ESCENARIO No.1. FUENTE: SOFTWARE ASM-1. ....	30
<b>FIGURA 3-3.</b> ESCENARIO No.2. FUENTE: SOFTWARE ASM-1. ....	32
<b>FIGURA 3-4.</b> ESCENARIO No.3. FUENTE: SOFTWARE ASM-1. ....	34
<b>FIGURA 4-1.</b> ESCENARIO No.1. FUENTE: SOFTWARE ASM-1. ....	36
<b>FIGURA 4-2.</b> GRÁFICA DEL SUSTRATO DISUELTO BIODEGRADABLE (Ss). FUENTE: SOFTWARE ASM-1. ....	37
<b>FIGURA 4-3.</b> GRÁFICA DEL SUSTRATO PARTICULADO BIODEGRADABLE (Xs). FUENTE: SOFTWARE ASM-1. ....	37
<b>FIGURA 4-4.</b> GRÁFICA DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO). FUENTE: SOFTWARE ASM-1. ....	38
<b>FIGURA 4-5.</b> GRÁFICA DE LA RELACIÓN DEL SUSTRATO DISUELTO BIODEGRADABLE (Ss) Y EL SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN DEL LICOR MEZCLA (SSLM). FUENTE: SOFTWARE ASM-1.....	39
<b>FIGURA 4-6.</b> GRÁFICA DE LA BIOMASA HETERÓTROFA. FUENTE: SOFTWARE ASM-1. ....	39
<b>FIGURA 4-7.</b> ESCENARIO No.2. FUENTE: SOFTWARE ASM-1. ....	40
<b>FIGURA 4-8.</b> GRÁFICA DEL SUSTRATO DISUELTO BIODEGRADABLE (Ss). FUENTE: SOFTWARE ASM-1. ....	41
<b>FIGURA 4-9.</b> GRÁFICA DEL SUSTRATO PARTICULADO BIODEGRADABLE (Xs). FUENTE: SOFTWARE ASM-1. ....	41
<b>FIGURA 4-11.</b> GRÁFICA DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO). FUENTE: SOFTWARE ASM-1. ....	42
<b>FIGURA 4-12.</b> GRÁFICA DE LA RELACIÓN DEL SUSTRATO DISUELTO BIODEGRADABLE (Ss) Y EL SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN DEL LICOR MEZCLA (SSLM). FUENTE: SOFTWARE ASM-1.....	43
<b>FIGURA 4-10.</b> GRÁFICA DE LA BIOMASA HETERÓTROFA. FUENTE: SOFTWARE ASM-1. ....	43
<b>FIGURA 4-13.</b> ESCENARIO No.3. FUENTE: SOFTWARE ASM-1. ....	44
<b>FIGURA 4-14.</b> GRÁFICA DEL SUSTRATO DISUELTO BIODEGRADABLE (Ss). FUENTE: SOFTWARE ASM-1. ....	45
<b>FIGURA 4-15.</b> GRÁFICA DEL SUSTRATO PARTICULADO BIODEGRADABLE(Xs). FUENTE: SOFTWARE ASM-1. ....	45
<b>FIGURA 4-16.</b> GRÁFICA DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO). FUENTE: SOFTWARE ASM-1. ....	46
<b>FIGURA 4-17.</b> GRÁFICA DE LA RELACIÓN DEL SUSTRATO DISUELTO BIODEGRADABLE (Ss) Y EL SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN DEL LICOR MEZCLA (SSLM). FUENTE: SOFTWARE ASM-1.....	47
<b>FIGURA 4-18.</b> GRÁFICA DE LA BIOMASA HETERÓTROFA. FUENTE: SOFTWARE ASM-1. ....	47

## LISTA DE TABLAS

<b>TABLA 3-1.</b> REPORTE DE RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN. FUENTE: UMNG.....	27
<b>TABLA 3-2.</b> FRAGMENTACIÓN DE LA DQO ESCENARIO No.1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	29
<b>TABLA 3-3.</b> FRAGMENTACIÓN DE LA DQO ESCENARIO No.2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	31
<b>TABLA 3-4.</b> FRAGMENTACIÓN DE LA DQO ESCENARIO No.3. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	33
<b>TABLA 4-1.</b> PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE DQO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	38
<b>TABLA 4-2.</b> PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE DQO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	42
<b>TABLA 4-3.</b> PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE DQO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	46

## RESUMEN

El incremento en la contaminación ambiental está generando interés en la aplicación y uso de herramientas computacionales que permiten modelar, calibrar y simular el comportamiento biológico y natural de los procesos de depuración necesarios para clarificar y remover materia orgánica del agua; en la actualidad y con la visión de descontaminar el río Bogotá surge el planteamiento de este proyecto con el objetivo de simular mediante el uso del software el proceso por lodos activados realizado en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Militar Nueva Granada - campus Cajicá, con lo cual se pretende evidenciar la eficiencia de remoción de materia orgánica a la salida del proceso y por consiguiente la calidad de agua que se está vertiendo al Río Bogotá, el proceso para lograr llevar a término satisfactorio el proyecto partió del análisis de información secundaria, la obtención del modelo matemático, y los respectivos análisis de laboratorio para determinar los parámetros solicitados para alimentar el software y tener los resultados, lo más cercanos a la realidad, permitiendo de esa manera, posterior a la calibración, determinar las variables más sensibles del proceso y el comportamiento del mismo en escalas determinadas de tiempo, producto del análisis y la información generada por el software uno de los problemas que se presenta en el proceso es el abultamiento de lodos, proceso en el que se generan pequeñas fibras entre el floc alterando su densidad impidiendo la decantación eficiente de los lodos generando valores altos en la DQO a la salida del proceso.

Palabras clave: Lodos activados, agua residual, depuración, materia orgánica, abultamiento de lodos, ASM1(Modelo de Lodos Activados 1).

## ABSTRACT

The increase in environmental pollution is generating interest in the application and use of computational tools that allow modeling, calibrating and simulating the biological and natural behavior of the purification processes necessary to clarify and remove organic matter from water; Currently, with the vision of decontaminating the Bogotá river, the project's approach arises with the objective of simulating, through the use of software, the activated sludge process carried out in the wastewater treatment plant of the Universidad Militar Nueva Granada - campus Cajica, which aims to demonstrate the efficiency of removal of organic matter at the exit of the process and therefore the quality of water that is being poured into the Bogotá River, the process to achieve a satisfactory completion of the project was based on the analysis of information secondary, obtaining the mathematical model, and the respective laboratory analysis to determine the requested parameters to feed the software and have the results, as close to reality, allowing in that way, after the calibration, determine the most sensitive variables of the process and the behavior of the same in certain scales of time, product of the analysis and the information generated by the software one of the problems that occurs in the process is the agglutination of sludge, a process in which small fibers are generated between the floc, altering its density, preventing the efficient decanting of the sludge, generating high values in the COD at the exit of the process

Keywords: Activated sludge, waste water, organic matter, sludge swelling, ASM1(Activated Sludge Model 1).

## INTRODUCCIÓN

En Colombia el acceso al agua se considera un derecho fundamental y se define como “el derecho de todos de disponer de agua suficiente, salubre, aceptable, accesible y asequible para el uso personal o doméstico” (Constituyente, 1991). Al ser los servicios públicos una finalidad social del Estado es responsabilidad de los municipios garantizar la prestación eficiente del servicio a todos los habitantes. Por otra parte, el saneamiento básico constituye una infraestructura esencial, ya que la higiene personal y territorial contribuye al bienestar de quienes habitan e interactúan en los distintos espacios que se frecuentan.

Al estar en constante crecimiento la población colombiana, es necesario ampliar la cobertura del servicio de saneamiento, lo que permite cada vez más implementar procesos de mejora para disminuir los residuos que generan fuertes impactos ambientales, así como también los costos en los métodos propuestos para reducir la carga de materia orgánica en el agua a tratar. Respecto al tratamiento de aguas residuales, en la implementación de plantas de tratamiento, como parte del proceso de tratamiento, se suele incorporar el tratamiento secundario de tipo biológico denominado Lodos Activados. Este tipo de procesos se usan para convertir en flog biológico, la materia orgánica fina coloidal y disuelta en el agua residual, siendo este sedimentable, así como también sólidos inorgánicos que pueden ser removidos en tanques de sedimentación. Estos procesos se emplean junto con procesos físicos y químicos para el tratamiento preliminar y primario del agua residual (GUJER, 1991).

Dentro del concepto de integralidad del drenaje urbano, el papel de las PTAR es recibir las aguas residuales y eventualmente las aguas lluvias o parte de estas, con unos estándares aceptables de cantidad y calidad de agua que ya han sido modificados por la primera parte del sistema, y llevar a cabo el tratamiento de dichas aguas hasta un nivel que satisfaga los criterios establecidos en la normativa y que cumpla los objetivos de calidad definidos por la autoridad

ambiental competente para el respectivo cuerpo receptor (Ministerio de Vivienda, 2017).

Con el presente proyecto se pretende realizar el análisis de la operación de la PTAR de la Universidad Militar Nueva Granada Campus Cajicá, que sirve a 15.000 estudiantes, identificando y examinando las características del afluente, control en el proceso y finalmente del efluente de este, determinando la eficiencia de la remoción de carga orgánica en el fluido mediante la modelación en el software ASM1, con el fin de recomendar alternativas de optimización en el proceso de tratamiento por lodos activados.

# 1 GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO

## 1.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Saneamiento sostenible de comunidades. **Eje Temático:** Tratamiento de Aguas Residuales

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.2.1 Antecedentes del problema

El consumo del recurso hídrico, a causa de la sobrepoblación actual, y teniendo en cuenta el desarrollo y crecimiento de las pequeñas poblaciones, hace necesario replantear y buscar la manera de mitigar el efecto contaminante que se genera en las fuentes superficiales de agua debido a los vertimientos puntuales posteriores al uso, consumo y desecho del recurso hídrico. El crecimiento de la población estudiantil requiere para su desarrollo contar con fuentes superficiales libres de contaminantes perjudiciales para la salud o que a su vez en los procesos de tratamiento de potabilización aguas abajo del vertimiento de la planta en estudio. También se debe tener en cuenta a la poblaciones vecinas se abastecen del recurso para realizar su tratamiento y potabilizar el agua para su consumo pueden generar reacciones químicas que permitan la generación de compuestos químicos volátiles como lo son los trihalometanos (THM) ya que por su naturaleza, presentan peligros a la salud, el ambiente y por sus características pueden llegar a ser cancerígenos, dichas reacciones se pueden presentar en el proceso de desinfección del agua por el contacto de materia orgánica no tratada con el cloro utilizado en el proceso mencionado anteriormente, por lo cual es necesario garantizar la remoción efectiva y eficiente de materia orgánica en el tratamiento por lodos activados antes de realizar el vertimiento, motivo por el cual se plantea este proyecto.

### **1.2.2 Pregunta de investigación**

¿Cuáles serán los posibles escenarios de tratamiento por lodos activados de la PTAR del Campus Cajicá de la Universidad Militar Nueva Granda, teniendo en cuenta las variables físicas del proceso y su sensibilidad según los resultados obtenidos mediante la modelación en el software libre ASM1?

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Teniendo en cuenta la problemática ambiental y abordando el tema específicamente desde el campo de la contaminación del recurso hídrico con materiales orgánicos producto del desarrollo y la vida misma de los seres humanos, se hace necesario analizar desde una perspectiva más eficiente la remoción de materia orgánica. Estudios realizados en la planta de tratamiento de aguas residuales en Apodaca (México), indican que los logros del uso del ASM1 son el consenso en los procesos, la estandarización de símbolos, la presentación matricial del modelo, la propuesta de valores por defecto de parámetros cinéticos, la adopción de la DQO fraccionada para caracterizar el influente y los lodos, además de un código de programación para el desarrollo futuro de software de modelación (NAVÍA, 2010, 46-54 p.). Por otra parte, cuando se planea simular una planta con el ASM1, uno de los objetivos es establecer el modelo hidráulico, la eficiencia del proceso se relaciona con la hidráulica del reactor. La definición de la estructura del modelo hidrodinámico es parte integrante en la mayoría de los protocolos de calibración.

Actualmente se dispone de varios modelos de lodos activados desarrollados para describir la transformación y degradación de la materia orgánica. Los más populares se derivan de la familia de los modelos de la IWA, con el ASM1, ASM2, ASM2d y ASM3. El ASM1 y el ASM3 son capaces de simular la remoción de sustrato definido en términos de la DQO y nutrientes (nitrógeno y fosforo). El ASM1 ha sido y es extensamente utilizado por la comunidad científica y es considerado actualmente como un referente de estudio en el estado

del arte de las investigaciones. El ASM3 fue introducido posteriormente a fin de corregir defectos conceptuales de su predecesor, pero presenta complejidad en los métodos de fraccionamiento. El ASM2 y ASM2d describen la transformación del fósforo y orthofosfatos. Por otra parte, la calibración del modelo consiste en el procedimiento de adoptar características que permitan describir y simular la información procedente de una planta de tratamiento de agua residual. En este procedimiento se encuentran desviaciones de 5 a 20% en régimen estacionario y de 10 a 40% en condiciones dinámicas, siendo frecuentes en esta última condición, aun con datos bien calibrados. Cuando se requiere la simulación para fines de optimización del proceso, será necesario calibrar el modelo con los datos del afluente y lodo de la misma planta (WERF, 2003).

Este modelo fue desarrollado inicialmente, para plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, para describir la remoción de carbono, materia orgánica y nitrógeno. El modelo ASM2, desarrollado por Henze et al. (1999), adiciona la actividad de desnitrificación producida por organismos acumuladores de fósforo, lo cual permite una mejor descripción de la dinámica del nitrato y del fosfato.

Como caso de estudio, se realiza una evaluación del proceso de remoción de materia orgánica en el proceso de los lodos activados en la PTAR del Campus Cajicá de la Universidad Militar Nueva Granada, y se pretende realizar la modelación mediante el uso de herramientas digitales con el fin de generar un modelo dinámico que permita simular el comportamiento bacteriano, logrando llegar a una aproximación y una calibración lo más cercano como sea posible a la realidad. Esto conllevará a la disminución de costos operativos, mantenimiento y al final en efluentes de buena calidad al ser retornado a la fuente donde retomará el ciclo hidrológico.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo general**

Analizar la operación del proceso de remoción de materia orgánica por lodos activados de la PTAR de la Universidad Militar Nueva Granada - Campus Cajicá mediante el software ASM1.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Identificar los principales parámetros fisicoquímicos del afluente y el efluente que intervienen en el proceso por lodos activados de la PTAR
- Realizar la modelación en el software ASM1 y determinar la eficiencia actual de remoción del proceso.
- Establecer diferentes escenarios de modelación para determinar las variables más sensibles del proceso.

## 2 MARCOS DE REFERENCIA

### 2.1 MARCO CONCEPTUAL

En las últimas décadas se han propuesto muchos modelos matemáticos para el proceso de lodos activados, los más avanzados permiten la simulación dinámica de esquemas de flujo del lodo activado complejo y puede incluir degradación de material orgánico, nitrificación, desnitrificación, incluso remoción biológica de fósforo o composición de biomasa. Ninguno de estos modelos ha alcanzado una amplia aceptación en la aplicación práctica, excepto modelos simplistas que son, en el mejor de los casos, adecuados para describir el estado estacionario de procesos de lodos activados completamente mezclados (AHNERT, 2004).

Los modelos matemáticos deterministas, describen sistemas de lodos activados basados en la ecuación del balance de materiales. Estas ecuaciones relacionan los cambios del estado del sistema (concentraciones) con los procesos de transporte y transformación. Los procesos de transporte son característicos para el diseño de un sistema (configuración del reactor, distribución del afluente, mezcla, eliminación de lodos en exceso, etc.), sin modificar la estructura química de todos los materiales. Los procesos de transformación se rigen por las condiciones intensivas e implican el cambio de la estructura química de los componentes. Por lo tanto, un modelo determinista de un sistema de lodo activado está compuesto por lo menos por los siguientes elementos (Submodelos):

- Una lista de componentes del interés, expresada como una serie de concentraciones  $[C_i]$
- Una caracterización de los procesos de transformación que afectan a estos componentes: el modelo biocinético, que consiste en la matriz estequiométrica  $[v_i, i]$  y la matriz de ecuaciones de velocidad de proceso  $[P_i]$ .

- Una caracterización del esquema de flujo del sistema, incluidos clarificadores secundarios, entrada y salida, así como equipos de aireación.

La mayoría de los modelos matemáticos que estudian el proceso de los lodos activados, encontrados en la literatura, difieren en la manera que se describe el proceso de la transformación biológica. El grupo de trabajo de IAWPRC identificó que varios de los modelos se presentan en submodelos identificables. Este grupo propuso presentar el modelo usado para el proceso de transformación biológica en forma de una matriz, la cual está claramente estructurada para poder ser leída fácilmente, y finalmente se podrá introducir en un ordenador en un programa de simulación.

Un ejemplo de matriz se presenta a continuación donde:

- Tres componentes son considerados como:
  - Oxígeno Disuelto con concentración  $S_o$  [gO<sub>2</sub> m<sup>3</sup>]
  - Sustrato disuelto orgánico con concentración  $S_s$  [gCOD m<sup>3</sup>]
  - Biomasa Heterotrófica con concentración  $X_H$  [gCOD m<sup>3</sup>]

Estos tendrán el índice  $i$  y serán introducidos en forma de un arreglo de concentraciones en la primera fila y con definiciones cortas, combinadas con la indicación de la forma en que son medidas (DQO, O<sub>2</sub>) en la fila más baja (H. REY, 2017). Dos procesos de transformación con el índice  $j$  son considerados: el crecimiento aeróbico de la biomasa heterotrófica a expensas del sustrato orgánico; la Lisis de la biomasa heterotrófica, un proceso el cuales usado para resumir el proceso que conducen a una pérdida de biomasa: Decaimiento, lisis, respiración endógena, depredación, etc. En el centro de la tabla se muestra el coeficiente de estequiometría  $[v_{i,j}]$  para los diferentes procesos en la forma de una matriz estequiométrica. En ella el proceso de crecimiento usa oxígeno disuelto y sustrato como eductos, que conduce a coeficientes negativos y produce biomasa, que conduce a coeficientes positivos. La Lisis consume biomasa y libera sustratos biodegradables, que vuelven a estar disponibles para el proceso de crecimiento. Se supone que la lisis no afecta ni se ve afectada por el oxígeno disuelto.

A la derecha, en la última columna, se define una ecuación de velocidad del proceso  $P_i$ . Estas ecuaciones son usadas para el proceso de crecimiento, como primer orden se usa la ecuación para la lisis. La esquina inferior izquierda corresponde a una definición corta de parámetros estequiométricos, la esquina inferior derecha contiene definiciones de parámetros cinéticos.

Componente $\rightarrow$	$X_{BH}$	$X_p$	$X_s$	$S_s$	$S_o$	Cinéticas
Reacciones $\downarrow$						
Crecimiento aerobio de $X_{BH}$	1			$\frac{1}{Y_H}$	$-\frac{1 - Y_H}{Y_H}$	$\mu_H \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_o}{K_{OH} + S_o} X_{BH}$
Hidrolisis Aerobia de $X_s$			1			$K_H \frac{\frac{X_s}{X_{BH}}}{K_Y + X_s} * \frac{S_o}{K_{OH} + S_o} X_{BH}$
Desaparición de $X_{BH}$	-1	$f_p$	$1 - f_p$			$b_H * X_{BH}$

Dónde:

$Y_H$ : Rendimiento para biomasa heterotrófica.

$\mu_H$ : Máxima tasa de crecimiento específico para biomasa heterótrofa.

$S_s$ : Sustrato disuelto biodegradable

$K_s$ : Coeficiente de saturación media para biomasa heterotrófica.

$S_o$ : Oxígeno Disuelto

$K_{OH}$ : Coeficiente de media saturación de oxígeno para biomasa heterótrofa.

$X_{BH}$ : Biomasa Heterótrofa.

$K_H$ : Tasa máxima de hidrólisis específica.

$X_s$ : Sustrato Particulado biodegradable.

$K_X$ : Coeficiente de media saturación para hidrólisis de sustrato lentamente biodegradable.

$b_H$ : Coeficiente de descomposición de la biomasa heterotrófica.

$f_p$ : Fracción de biomasa convertida en materia inerte.

La matriz estequiométrica se refiere a la conservación de la masa, elementos, etc., en la dirección horizontal. En el ejemplo específico, no puede aparecer ningún DQO en su proceso. Esto está claramente indicado para el proceso de lisis, donde la suma de todos los coeficientes estequiométricos da igual a cero. Desde que el oxígeno disuelto es equivalente a la DQO negativa, la continuidad de la DQO para el crecimiento debe ser escrita como  $-V_{1,1} + V_{1,2} + V_{1,3} = 0$ .

El ASM1 es útil para la predicción de la degradación de materia orgánica y desnitrificación, nitrificación, la distribución del consumo del oxígeno a lo largo de un reactor tipo 'flujo pistón', producción de lodo y la variación de la calidad del efluente bajo condiciones de procesos dinámicos (H. REY, 2017).

En la aplicación del modelo, se encuentran los siguientes problemas:

- El proceso de hidrólisis no está bien documentado debido a la dificultad de diseñar los experimentos que son específicos para la investigación de este proceso.
- El uso de la función de conmutación múltiple tipo Monod en las ecuaciones de velocidad de proceso conduce a una disminución general de la tasa calculada, que debe ser compensada por el uso de una tasa de crecimiento máxima específica más alta. Esto no es un problema desde el punto de vista del modelo, pero podría confundir al usuario si se mira la tasa de crecimiento sin considerar su forma de aplicación.
- No se incluye una influencia de pH en las tasas de proceso. Esto requiere incluir formas de carbono orgánico y CO<sub>2</sub> en el modelo y haría el modelo aún más complejo, como un proceso simple de alcalinidad, se usa la alternativa del bicarbonato y se ha incluido como un componente modelo, esto permite estimar un valor de pH, que es principalmente importante si el agua residual de baja alcalinidad debe ser nitrificada.
- La caracterización de las aguas residuales en forma de componentes modales es compleja. Un indirecto análisis químico es conocido por S<sub>s</sub> de material orgánico fácilmente biodegradable, es necesario contar con pruebas biológicas costosas y complejas. La

experiencia con el modelo indica; que la composición de las aguas residuales varía de un lugar a otro, por lo tanto, la caracterización del agua residual es importante

- El modelo se basa en muchos parámetros cinéticos. Se dispone de buenas estimaciones para estos parámetros y parecen ser bastante uniformes para diferentes lugares, siempre que el agua sea de origen doméstico. Para otros residuos, la determinación necesaria de estos parámetros es costosa y compleja.

A pesar de todos estos problemas, el modelo se ha convertido en una valiosa herramienta analítica para activar procesos de lodo para aguas residuales domésticas, principalmente para condiciones de estado no estacionario. La aplicación de un modelo biocinético tan complejo como el 'ASMI' para la predicción del comportamiento de un esquema de flujos de múltiples reactores bajo carga externa dependiente del tiempo, condiciones y posiblemente con las consideraciones de las estrategias de control de procesos solo es posible con la ayuda de los programas de simulación. Hoy tales programas están disponibles para computadoras personales y pueden ser utilizados para una variedad de aplicaciones tales como enseñanza, investigación, diseño y operación (P.A. VANROLLEGHEM, 1999).

### **PROCESO DE TRATAMIENTO DE LODOS ACTIVADOS:**

Los lodos activados es un sistema ampliamente utilizado a nivel mundial, para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales, en situaciones en que se requiere una elevada calidad del efluente y reducidos requisitos de área. Este es un proceso de tratamiento biológico que trabaja bajo principio aeróbico (presencia de oxígeno) en fase de respiración endógena de la curva de crecimiento bacteriana a baja carga con estabilización aerobia de lodos en exceso. Este proceso consiste en provocar y favorecer el desarrollo de una colonia bacteriana en un depósito de aireación alimentado con el afluente a tratar.

El tanque de aireación va equipado con un sistema de aireación conformado por un soplador y 34 difusores de aire. La aireación en este depósito se lleva a cabo durante 8 horas;

tiempo donde la masa biológica desarrollada utiliza la DBO del afluente crudo para la síntesis de materia celular viviente, es decir utiliza la materia orgánica como alimento; este proceso se asimila al de cualquier ser viviente que requiere de oxígeno y alimento para sobrevivir. De esta manera se procede a una eliminación biológica de la polución por asimilación en la masa bacteriana.

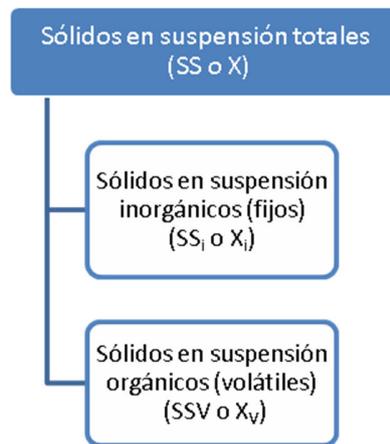
La mezcla del afluente con la colonia bacteriana es denominada licor mixto. Este licor es a continuación enviado a un clarificador o decantador secundario con el fin de separar el efluente tratado de los lodos activados. Mientras el efluente es recuperado superficialmente para su disposición final, los lodos son recogidos en el fondo del clarificador y recirculados, por medio de un sistema “air lift”- (sistema que no requiere bombeo) hacia el tanque de aireación con el fin de mantener en el mismo una concentración suficiente. Esta recirculación puede llegar hasta el 100% del caudal nominal de la planta.

Una fracción de estos lodos debe ser llevado a filtro prensa de acuerdo con el exceso de lodos producidos. El volumen de lodos producidos es grande, teniendo en cuenta que se produce 0.3 Kg de lodo por cada Kg de DBO5 (dato teórico) con una humedad del 98%, el sistema más elemental es proceder a la deshidratación de este por medio de concentrador de lodos y filtro prensa (Manual de operación y funcionamiento de la Planta de tratamiento de aguas residuales domesticas para la UMNG Sede Cajicá – Módulo Uno, 2008).

## **REPRESENTACIÓN SÓLIDOS MICROBIANOS (BIOMASA) Y MATERIA CARBONÁCEA**

La unidad de masa de las células microbianas es normalmente expresada en términos de sólidos en suspensión (SS), toda vez que la biomasa es constituida por sólidos que se encuentran suspendidos en el reactor (en el caso de crecimiento disperso). Sin embargo, no toda la masa de sólidos participa de la conversión del sust5rato orgánico, habiendo una fracción inorgánica que no desempeña funciones en términos del tratamiento biológico. De esta forma, la biomasa es

también frecuentemente expresada en términos de sólidos en suspensión volátiles (SSV). Tales sólidos representan la fracción orgánica de la biomasa, ya que la materia orgánica puede ser volatilizada, o sea, convertida en gas por combustión (oxidación) (SPERLING, 2014).



**Figura 2-1.** Composición de los sólidos en suspensión totales. Fuente: Elaboración Propia.

### **Materia carbonácea:**

En términos de la materia carbonácea, el presente texto adopta las  $DBO_5$  como la variable representativa del sustrato. En consecuencia, se adoptan las siguientes formas de representación del sustrato (materia carbonácea):

- Sustrato afluente  $S_0$  ( $DBO_5$  efluente). Representa la  $DBO_5$  total afluente al reactor.

Inclusive en sistemas dotados de sedimentación primaria, cerca de 1/3 de los sólidos en suspensión no son removidos en esta etapa, ingresando al reactor. En este, los sólidos en suspensión son adsorbidos al floc, y convertidos en sólidos solubles por el mecanismo de la hidrólisis, sufriendo después de ella las reacciones de oxidación. Por lo anterior, tanto los sólidos solubles como los sólidos en suspensión afluentes al reactor deben ser computados como sustrato afluente a ser removido.

- Sustrato efluente S (DBO<sub>5</sub> efluente). Representa la DBO<sub>5</sub> soluble efluente del reactor.

Aunque el efluente del reactor pueda contener una elevada concentración de sólidos en suspensión, tales sólidos son posteriormente removidos en la etapa posterior de sedimentación. En el dimensionamiento del reactor, no tiene sentido el computar la DBO total efluente de este, pues esta puede ser mucho mayor a la DBO afluente, debido a la elevada concentración de materia orgánica en suspensión representada por la población microbiana.

Para este caso de estudio, se utilizó el valor de la DQO debido a que los coeficientes y las tasas del proceso que usa el software están aplicadas para el cálculo de la Demanda Química de Oxígeno (SPERLING, 2014).

### **3.1.2.3 MODELO ASM-1:**

El modelo (ASM1) está basado en una interpretación mecanicista del comportamiento de los organismos y ha demostrado ser capaz de dar una descripción adecuada del comportamiento de los sistemas de fangos activados para la eliminación de materia orgánica para un amplio número de configuraciones (DOLD, 1986).

El modelo ASM1 describe fundamentalmente los procesos de remoción de materia orgánica con el consumo simultáneo de oxígeno y nitrato como aceptor de electrones. Incluye ocho procesos, de los cuales tres están relacionados con el crecimiento de la biomasa heterótrofa y autótrofa, dos representan los procesos de lisis de la biomasa y tres describen los procesos de hidrólisis de la materia orgánica.

El modelo se debe calibrar bajo parámetros de coeficientes cinéticos y estequiométricos, que se describirán más adelante.

## 2.2 MARCO GEOGRÁFICO

La planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) está localizada en el municipio de Cajicá en el departamento de Cundinamarca. Está construida en concreto reforzado en sus partes externas y PRFV (poliéster reforzado con fibra de vidrio) en sus partes internas. Cuenta con un tren de tratamiento donde incluye el proceso por lodos activados. El proceso total puede demorar aproximadamente 2 horas hasta ser vertida en el río Bogotá, el cual se encuentra aproximadamente a 500 metros de la planta.



**Figura 2-2.** Localización de la PTAR en el Campus Cajicá UMNG. Fuente: Google Earth

El funcionamiento del proceso de tratamiento en la PTAR es el siguiente:



**Figura 2-3. Proceso de Tratamiento PTAR UMNG. Fuente: Elaboración Propia.**

<b>CAPTACIÓN DE AGUA Y PRETRATAMIENTO</b>	El agua procedente de las descargas del campus (Baños, cocinas, sanitarios, duchas, etc) llegan a un colector principal. Pasa por un sistema de tratamiento preliminar donde se eliminan materiales sólidos de gran tamaño, como palos, hojas, preservativos, etc, por medio de rejillas de desbaste grueso y rejillas de desbaste fino. Posteriormente el agua pasa por un desarenador donde se eliminan las arenas y tierras. Finalmente pasa a una trampa de grasas para la eliminación de las mismas.
<b>MEDICION DE CAUDAL</b>	El agua pasa por una canaleta parshall donde se mide el caudal de entrada al sistema. Las aguas residuales llegan a un tanque de amortización de caudales, por gravedad. El cual permite regular, igualar y amortizar el caudal en los momentos en que se presentan picos máximos y mínimos. Luego el agua es conducida al tanque de aireación por gravedad.
<b>PTAR - LODOS ACTIVADOS</b>	El agua entra al tanque de aireación, donde se realiza el proceso de tratamiento biológico de tipo aeróbico (presencia de oxígeno) y se airea por medio de la inyección de aire del soplador a los difusores, estos últimos crean una microburbuja fina.  Después de un tiempo de retención de 8 horas en el tanque de aireación, el agua es conducida al tanque de Sedimentación, con el fin de separar el agua tratada de los lodos. El tratamiento aeróbico genera la separación del agua y los lodos, los cuales son enviados al tanque de sedimentación. Luego ahí se inyecta aire generado por el soplador empleando una tubería independiente permitiendo que los lodos viajen a través del air-lift. Desde ahí se retiran los lodos, los cuales son enviados al concentrador de lodos o a la cabeza de proceso con el fin de crear la masa bacterial (Lodos activados) empleando air-lift (sistema que evita el empleo de bombas utilizando el aire del soplador).
<b>DESINFECCIÓN Y DESCARGA</b>	El agua tratada pasa a un tanque de contacto donde se le suministra una solución de cloro gaseoso, con lo cual se busca la desinfección, eliminando las bacterias que puedan encontrarse en el agua. Después de este tratamiento se le realiza una nueva medición de caudal y se deja en condiciones aptas para realizar la entrega al río Bogotá, cumpliendo con el Decreto 1594 de 1984 del Ministerio de salud.
<b>TRATAMIENTO DE LOS LODOS PRODUCIDOS</b>	Los lodos producidos del tratamiento aeróbico son enviados a una caja de recolección por medio de impulsión de aire "air-lift" (sistema que evita el empleo de bombas utilizando el aire del soplador). De ahí los lodos son bombeados a un concentrador, con el fin de reducir el porcentaje de humedad (agua-lodo) de 4 a 6%.  Los lodos son enviados a un sistema de filtro prensa, por medio de una bomba neumática, para reducir el porcentaje de humedad hasta el 10%, donde se secan y quedan listos para ser utilizados como abono o en labores de jardinería. Estos lodos secos son ricos en nutrientes que sirven para recuperación de suelos erosionados, labores e jardinería o en su defecto disponerse en un relleno sanitario. Se usa bombeo neumático y el lixiviado generado del concentrador y filtro prensa son conducidos nuevamente a la cabeza de proceso.

### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 FASES DEL TRABAJO DE GRADO

##### 3.1.1 FASE I:

Se recopiló información existente con respecto a estudios realizados mediante la modelación del software ASM1. Entre la información más relevante se tienen artículos como MODELACIÓN DINÁMICA DE FANGOS ACTIVOS: ASM 1 – IWA (A. JACOME, 2014), donde se establece el protocolo de simulación de las plantas de tratamiento. Inicialmente se establecen los objetivos, se hace la descripción de procesos, recopilación y verificación de datos, estructura del modelo, caracterización de flujos, calibración y la validación. Por otra parte, se obtiene, a partir de la validación, todos los estudios de optimización para emitir el proceso óptimo de operación de la planta. Otro artículo relevante es el de “Fraccionamiento de DQO del agua residual de Toluca por el protocolo STOWA”, artículo útil para identificar a que corresponde el fraccionamiento de la DQO.

##### 3.1.2 FASE II:

Se realizó la visita de campo a la planta para conocer su funcionamiento, su estado actual y se recopiló la información requerida de la caracterización y los ensayos realizados del afluente y efluente. Los datos requeridos se muestran a continuación:

**Tabla 3-1.** Reporte de resultados de la caracterización. Fuente: UMNG.

REPORTE DE RESULTADOS											
Fecha de Análisis (AAAA-MM-DD)	Item	Parámetro	Método	Técnica Analítica	Límite de Cuantificación del método	Unidad	ENTRADA PTAR		SALIDA PTAR		RESOLUCIÓN 631 DE 2015 Art. 15
							UTM 18 N		UTM 18 N		
							609841 545880	MI 37274	609878 545865	MI 37393	
20/01/2018	13	DQO (Demanda Química de Oxígeno)*	SM 5220 D	Reflujo cerrado y Colorimetría	5	mg O2/L	97.6	53.4	150		
20/01/2018	31	Sólidos suspendidos totales*	SM 2540 D	Gravimetría Secado 103-105°C	10,0	mg/L	180	48,0	50		
20/01/2018	31	Sólidos totales*	SM 2540 B	Gravimetría Secado 103-105°C	10	mg/L	750	364	N.E.		

Donde se observa que la demanda química de oxígeno corresponde 97.6 g/m<sup>3</sup> a la entrada de la planta y a la salida se indica un valor de 53.4g/m<sup>3</sup>. Por otra parte, se observan los valores de los sólidos suspendidos totales equivalentes a la entrada y salida de la planta de tratamiento a 180 g/m<sup>3</sup> y 48 g/m<sup>3</sup> respectivamente.

Con los datos obtenidos de la caracterización, se realizó el proceso necesario para lograr la calibración del modelo indicando los coeficientes estequiométricos y cinéticos, como se muestra en la figura Figura 3-1 y posteriormente se plantearon 3 escenarios de simulación, descritos a continuación:

Cinéticas (por defecto valores standard ASM1 a 20°C)			
$\mu_h$	6 día <sup>-1</sup>	$k_h$	3 día <sup>-1</sup>
$\mu_a$	0.8 día <sup>-1</sup>	$K_x$	0.03 -
$K_s$	20 g/m <sup>3</sup>	$K_{O,A}$	0.4 g/m <sup>3</sup>
$K_{O,H}$	0.2 g/m <sup>3</sup>	$b_H$	0.62 día <sup>-1</sup>
$K_{NH,H}$	0.05 g/m <sup>3</sup>	$b_A$	0.15 día <sup>-1</sup>
$K_{NH}$	1 g/m <sup>3</sup>	$\eta_g$	0.8 -
$K_{NO}$	0.5 g/m <sup>3</sup>	$\eta_h$	0.4 -
$k_s$	0.08 m <sup>2</sup> /(g·día)		
Estequiométricas			
$Y_H$	0.67 -	$i_{COD\_NO3}$	-4.571 -
$f_P$	0.08 -	$i_{NO3,N2}$	2.857 -
$Y_A$	0.24 -	$i_{Charge\_SNHx}$	0.071 -
$i_{B}$	0.086 -	$i_{Charge\_SNOx}$	-0.07143 -
$i_{P}$	0.06 -		
Concentración de saturación de oxígeno			9 g/m <sup>3</sup>

**Figura 3-1.** Coeficientes estequiométricos y cinéticos de calibración. Fuente: Software ASM-1.

### **Escenario 1: FUNCIONAMIENTO ACTUAL DE LA PLANTA**

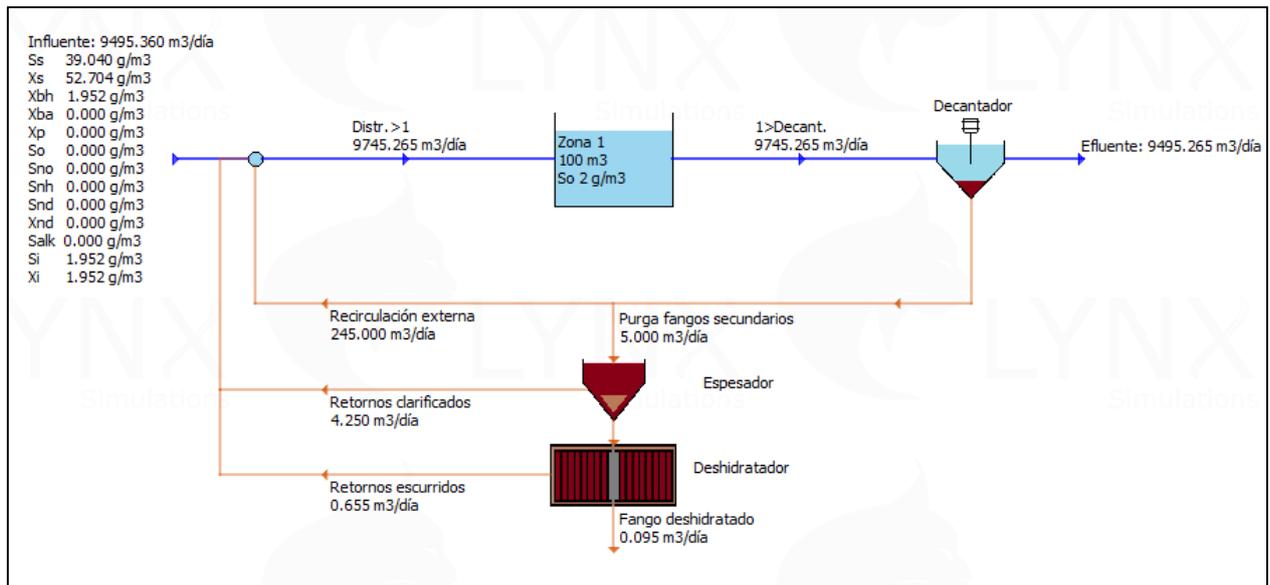
Este escenario contempla el funcionamiento actual de la planta, partiendo de los resultados de la DQO obtenida de los ensayos de laboratorio realizados en la UMNG. Posteriormente se realizó una fragmentación porcentual del valor de la DQO de acuerdo con los datos de entrada requeridos por el software.

**Tabla 3-2.** Fragmentación de la DQO Escenario No.1. Fuente: Elaboración propia.

PARÁMETRO	VALORES EN PORCENTAJE DE DQO	
	VALOR (gr/m <sup>3</sup> )	% DE DQO
S <sub>i</sub>	1.952	2%
S <sub>s</sub>	39.04	40%
X <sub>BH</sub>	1.952	2%
X <sub>i</sub>	1.952	2%
X <sub>s</sub>	52.704	54%
<b>DQO Total</b>	97.6	100%
<b>Q(l/s)</b>	109.9	
<b>Q(m<sup>3</sup>/día)</b>	9495.36	
<b>Cs(g/m<sup>3</sup>)</b>	6.83	

Con base a la fragmentación, los porcentajes asignados para cada uno de los parámetros contenidos en la tabla corresponden a: Sustrato disuelto inerte(S<sub>i</sub>) 2%; Sustrato disuelto biodegradable (S<sub>s</sub>) 40%; Biomasa Heterótrofa(X<sub>BH</sub>) 2%; Sustrato particulado inerte(X<sub>i</sub>) 2%; Sustrato particulado biodegradable(X<sub>s</sub>) 54%. La sumatoria de estos porcentajes en valor corresponde al registrado en la caracterización como DQO total en el afluente del proceso, correspondiente a 97.6 g/m<sup>3</sup>.

La información anterior es ingresada en el software como se muestra en la siguiente figura, teniendo en cuenta que el caudal registrado del afluente corresponde a 109.9 l/s lo que equivale a 9495.36 m<sup>3</sup>/día, unidades solicitadas por el modelo:



**Figura 3-2.** Escenario No.1. Fuente: Software ASM-1.

En la figura se observa que el caudal de recirculación externa corresponde a 245,000 m3/día, el caudal de retornos clarificados es de 4,250 m3/día y el caudal de retornos escurridos corresponde a 0.655 m3/día.

**Escenario 2: FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DUPLICANDO LA ENTRADA DE CAUDAL**

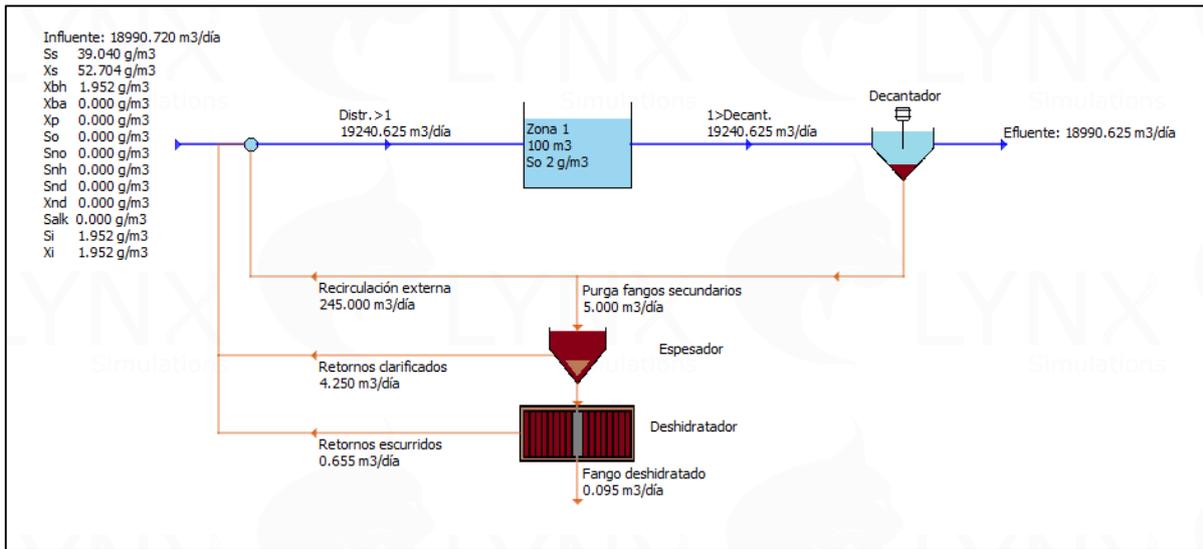
Este escenario considera el doble del caudal para el análisis del funcionamiento de la planta y se determina la composición porcentual de cada uno de los parámetros de entrada solicitados por el modelo ASM 1, como se indica en la siguiente tabla:

**Tabla 3-3.** Fragmentación de la DQO Escenario No.2. Fuente: Elaboración propia.

PARÁMETRO	VALORES EN PORCENTAJE DE DQO	
	VALOR(gr/m3)	% DE DQO
<b>S<sub>i</sub></b>	1.952	2%
<b>S<sub>s</sub></b>	39.04	40%
<b>X<sub>BH</sub></b>	1.952	2%
<b>X<sub>i</sub></b>	1.952	2%
<b>X<sub>s</sub></b>	52.704	54%
<b>DQO Total</b>	97.6	100%
<b>Q(l/s)</b>	109.9	
<b>Q(m3/día)</b>	18,990.72	

Con base a la fragmentación, los porcentajes asignados para cada uno de los parámetros contenidos en la tabla corresponden a: Sustrato disuelto inerte(S<sub>i</sub>) 2%; Sustrato disuelto biodegradable (S<sub>s</sub>) 40%; Biomasa Heterótrofa(X<sub>BH</sub>) 2%; Sustrato particulado inerte(X<sub>i</sub>) 2%; Sustrato particulado biodegradable(X<sub>s</sub>) 54%. La sumatoria de estos porcentajes en valor corresponde al registrado en la caracterización como DQO total en el afluente del proceso, correspondiente a 97.6 g/m<sup>3</sup>.

La información anterior es ingresada en el software como se muestra en la siguiente figura, teniendo en cuenta que el doble del caudal registrado del afluente corresponde a 219.8 l/s lo que equivale a 18,990.72m<sup>3</sup>/día, unidades solicitadas por el modelo:



**Figura 3-3.** Escenario No.2. Fuente: Software ASM-1.

En la figura se observa que el caudal de recirculación externa corresponde a 245,000 m<sup>3</sup>/día, el caudal de retornos clarificados es de 4,250 m<sup>3</sup>/día y el caudal de retornos escurridos corresponde a 0.655 m<sup>3</sup>/día.

**Escenario 3: FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA CON REDUCCIÓN DE DQO A MENOS DE 30 g/m3**

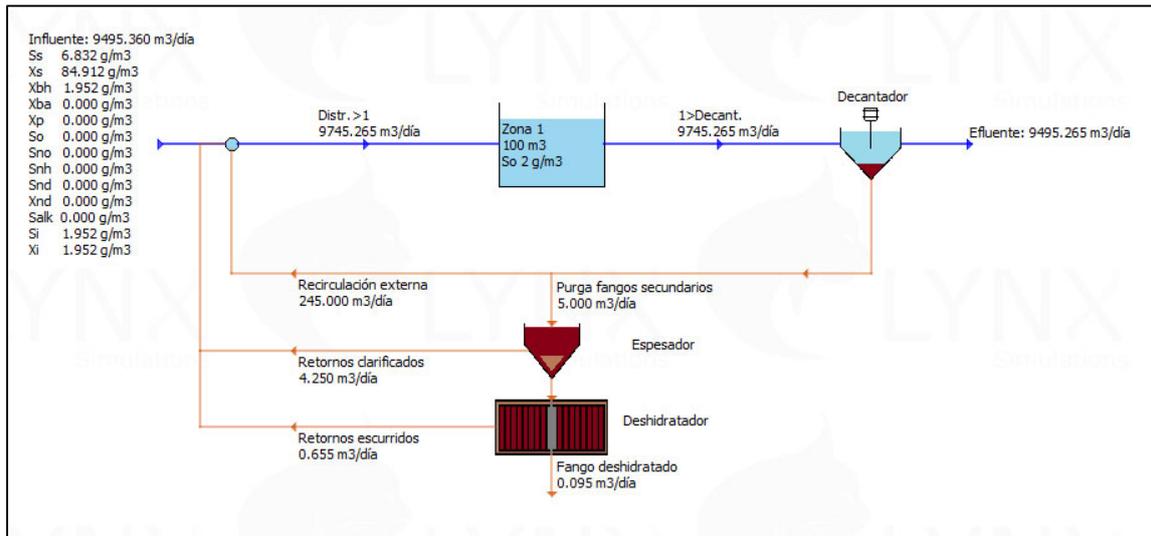
Este escenario considera la reducción de la DQO aproximadamente en un 70%. Para este escenario la fragmentación de la DQO tiende a dar una asignación de porcentaje más alta en el Sustrato particulado biodegradable (Xs).

**Tabla 3-4.** Fragmentación de la DQO Escenario No.3. Fuente: Elaboración propia.

PARÁMETRO	VALORES EN PORCENTAJE DE DQO	
	VALOR (gr/m3)	% DE DQO
<b>S<sub>i</sub></b>	1.952	2%
<b>S<sub>s</sub></b>	6.832	7%
<b>X<sub>BH</sub></b>	1.952	2%
<b>X<sub>i</sub></b>	1.952	2%
<b>X<sub>s</sub></b>	84.912	87%
<b>DQO Total</b>	97.6	100%
<b>Q(l/s)</b>	109.9	
<b>Q(m3/día)</b>	9495.36	

Con base a la fragmentación, los porcentajes asignados para cada uno de los parámetros contenidos en la tabla corresponden a: Sustrato disuelto inerte(Si) 2%; Sustrato disuelto biodegradable (Ss) 7%; Biomasa Heterótrofa(X<sub>BH</sub>) 2%; Sustrato particulado inerte(Xi) 2%; Sustrato particulado biodegradable(Xs) 87%. La sumatoria de estos porcentajes en valor corresponde al registrado en la caracterización como DQO total en el afluente del proceso, correspondiente a 97.6 g/m3. En este caso, el mayor porcentaje se ve reflejado en el sustrato particulado biodegradable.

La información anterior es ingresada en el software como se muestra en la siguiente figura, teniendo en cuenta que el caudal registrado del afluente corresponde a 109.9 l/s lo que equivale a 9495.36 m<sup>3</sup>/día, unidades solicitadas por el modelo:



**Figura 3-4.** Escenario No.3. Fuente: Software ASM-1.

En la figura se observa que el caudal de recirculación externa corresponde a 245,000 m<sup>3</sup>/día, el caudal de retornos clarificados es de 4,250 m<sup>3</sup>/día y el caudal de retornos escurridos corresponde a 0.655 m<sup>3</sup>/día.

### 3.2 INSTRUMENTOS O HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Instalaciones: Visita de campo a la planta de tratamiento en el municipio de Cajicá, Laboratorio de Saneamiento UMNG, Sala de computo Universidad Católica de Colombia y el hogar propio.

Equipo Requerido:

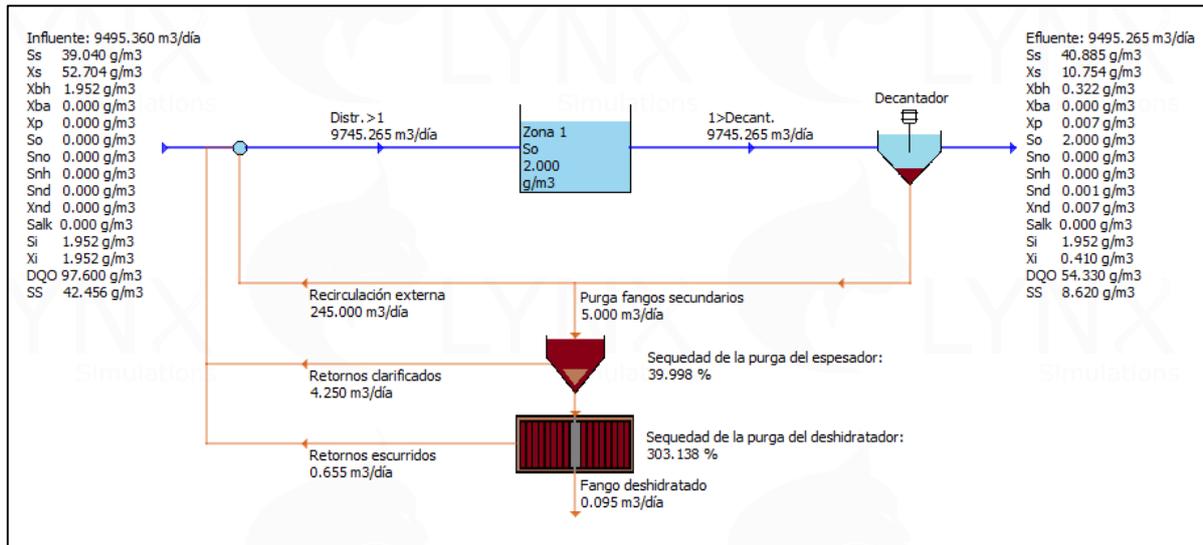
- Vehículo para realizar las visitas en campo necesarias

- Equipo de cómputo, con el software ASM1, AutoCAD, Microsoft Office con licencias académica.
- Impresora
- Cámara Fotográfica
- Celular
- Caracterización (documento que proporcionará la UMNG para el estudio)

## 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### ***Escenario 1. FUNCIONAMIENTO ACTUAL DE LA PLANTA***

Como resultado de la simulación se obtuvo la siguiente información:

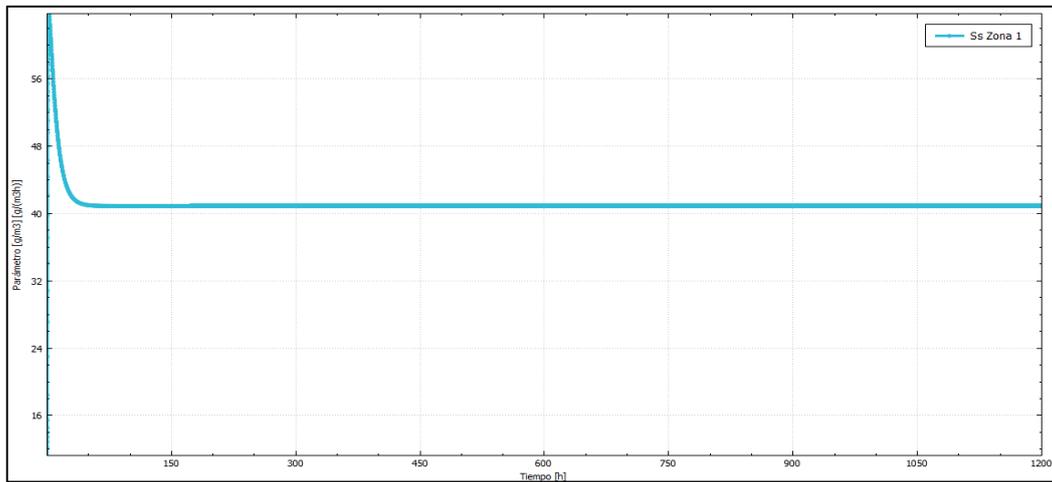


**Figura 4-1.** Escenario No.1. Fuente: Software ASM-1.

Se observa una reducción de DQO del 45.28%, disminuyendo de 97.6 g/m<sup>3</sup> a 54.33 g/m<sup>3</sup>; el Sustrato disuelto inerte(Si) se mantiene en 1.952 g/m<sup>3</sup>; Sustrato disuelto biodegradable (Ss) pasa de 39.040 g/m<sup>3</sup> a 40.885 g/m<sup>3</sup>, lo que supone un posible abultamiento de lodos, fenómeno que aparece en las plantas de tratamiento por lodos activados cuando éstos ocupan un volumen excesivo y no sedimentan fácilmente. La Biomasa Heterótrofa(X<sub>BH</sub>) pasa de 1.952 g/m<sup>3</sup> a 0.322 g/m<sup>3</sup>, el decaimiento recicla la materia orgánica de las células en forma de sustrato particulado biodegradable (Xs) y una pequeña fracción de inertes (Xi); el sustrato particulado inerte(Xi) pasa de 1.952 g/m<sup>3</sup> a 0.410 g/m<sup>3</sup> y el sustrato particulado biodegradable(Xs) pasa de 52.704 g/m<sup>3</sup> a 10.754 g/m<sup>3</sup>, esta hidrólisis produce el Sustrato disuelto biodegradable (Ss) que sirve para sostener el crecimiento de la biomasa heterótrofa, el cual es consumido por la biomasa.

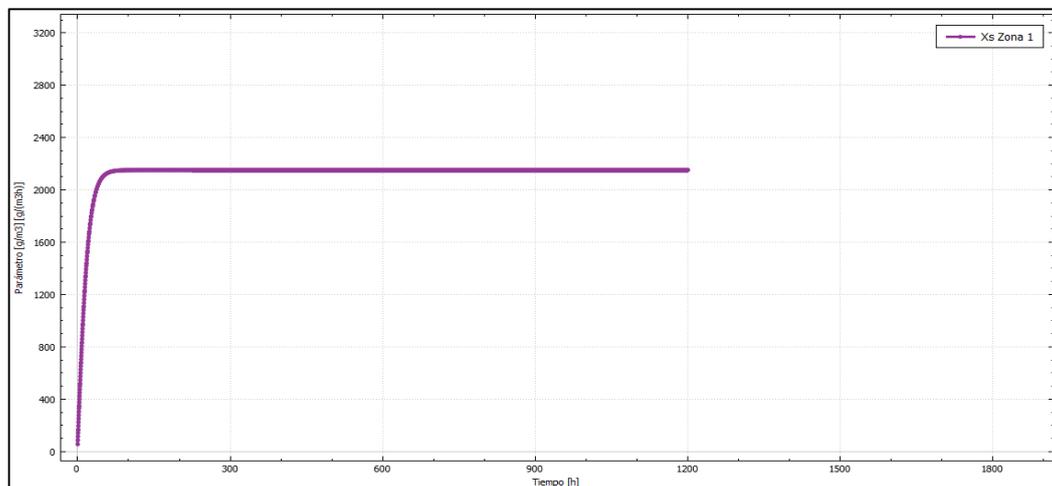
Las gráficas que representan el comportamiento a lo largo de la simulación se muestran a continuación:

En la simulación de cinco días, entre el día dos y tres la carga o sustrato se estabiliza en 40 mg/l por cada mg/l de DQO que entra, como se observa en la **Figura 4-2**:



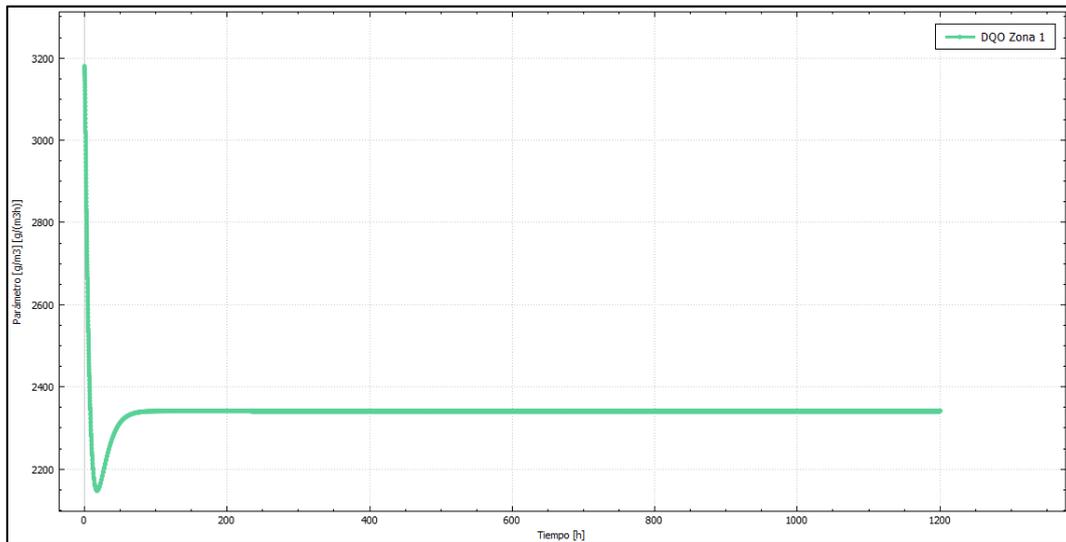
**Figura 4-2.** Gráfica del Sustrato disuelto biodegradable (Ss). Fuente: Software ASM-1.

La concentración de la biomasa en el reactor después de 150 horas, se establece entre 2100 y 2200mg/L, como se muestra en la **Figura 4-3**:



**Figura 4-3.** Gráfica del Sustrato particulado biodegradable (Xs). Fuente: Software ASM-1

La concentración de DQO baja de 3200 a 2200 mg/l por hora oxidada, del cual 1144 mg/l por cada mg/l de agua tratada corresponde al 52% de la biomasa fácilmente biodegradable, como se muestra en la **Figura 4-4**:

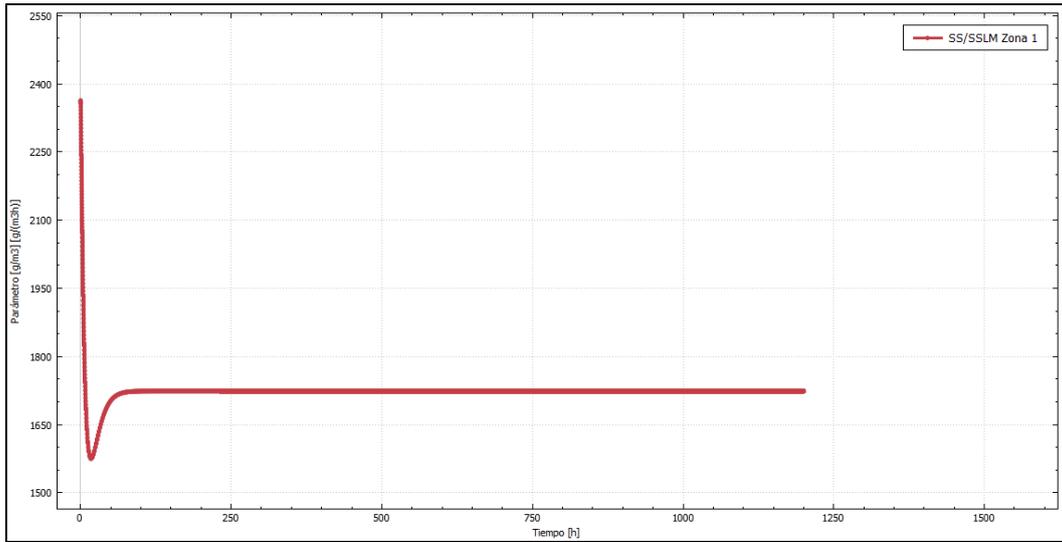


**Figura 4-4.** Gráfica de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Fuente: Software ASM-1

**Tabla 4-1.** Porcentaje de reducción de DQO. Fuente: Elaboración propia.

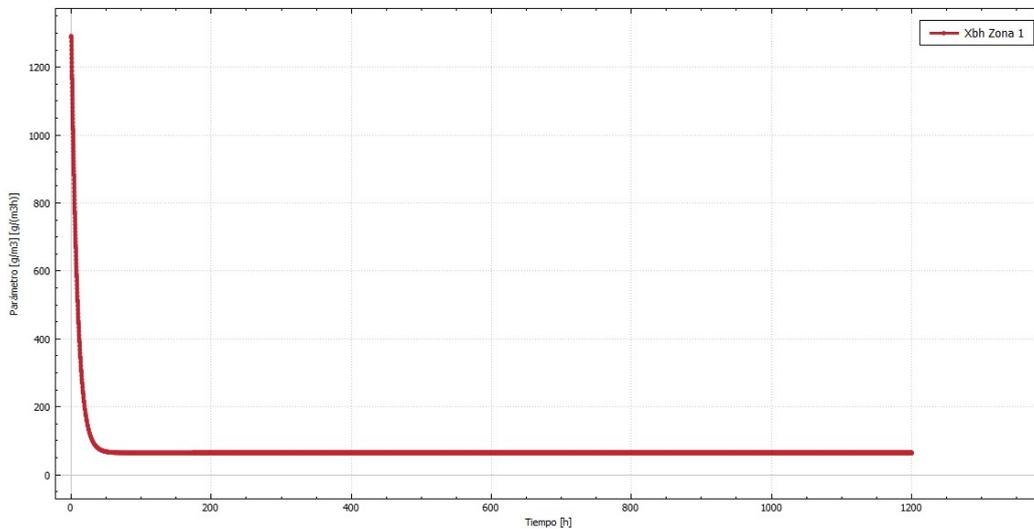
Parámetro	UN	ENTRADA	SALIDA	Referencia del Dato	Porcentaje de remoción
DQO (Demanda Química de Oxígeno) *	mg/l	97.6	53.4	Análisis de laboratorio	45.28%
DQO (Demanda Química de Oxígeno) *	g/m3	97.6	54.33	Modelación ASM 1	44.33%

En la **Figura 4-5**, se observa la relación entre los sólidos suspendidos totales y los sólidos en suspensión de licor mezcla. La simulación arroja como resultado que la biomasa lentamente biodegradable corresponde a 356 mg/l.



**Figura 4-5.** Gráfica de la relación del Sustrato disuelto biodegradable (Ss) y el Sólidos en Suspensión del Licor Mezcla (SSLM). Fuente: Software ASM-1

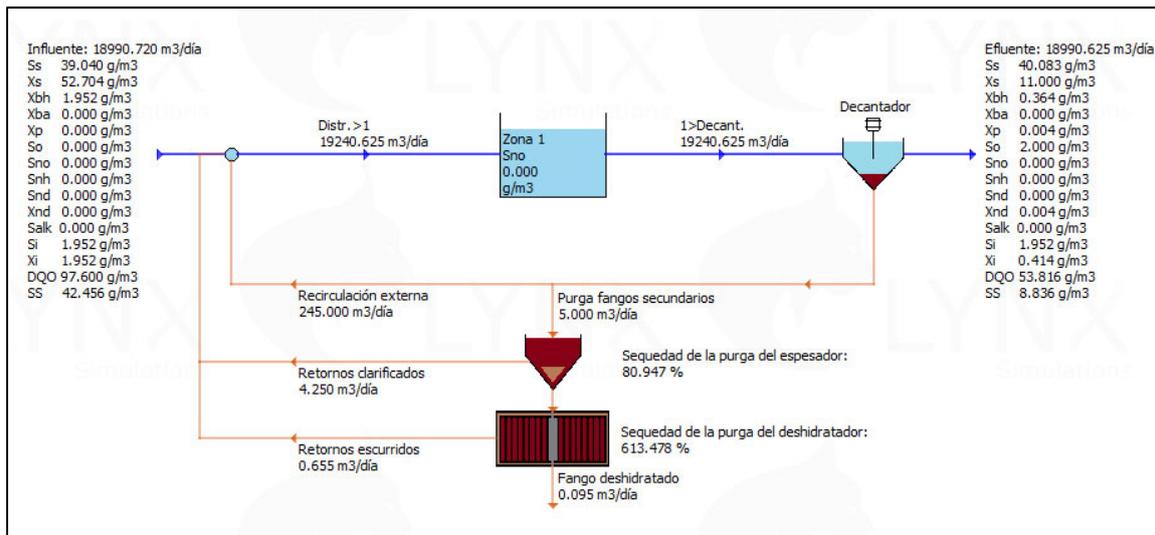
Las bacterias que eliminan la materia orgánica o fácilmente biodegradable son representadas por la biomasa, que de acuerdo a la simulación presenta un valor de 78 mg/l por cada hora de oxígeno suministrado.



**Figura 4-6.** Gráfica de la Biomasa Heterótrofa. Fuente: Software ASM-1

**Escenario 2: FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DUPLICANDO LA ENTRADA DE CAUDAL**

Como resultado de la simulación se obtuvo la siguiente información:

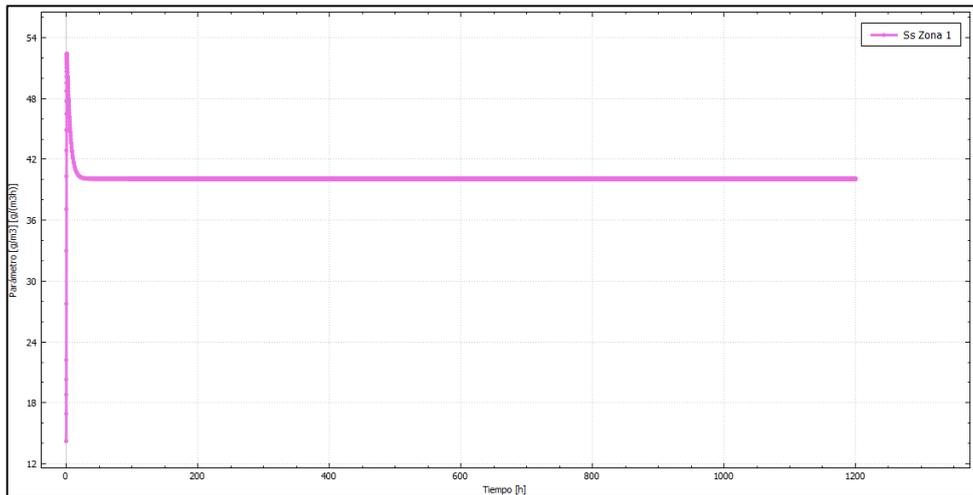


**Figura 4-7.** Escenario No.2. Fuente: Software ASM-1.

Se observa una reducción de DQO del 44.86%, disminuyendo de 97.6 g/m<sup>3</sup> a 53.816 g/m<sup>3</sup>; el Sustrato disuelto inerte(Si) se mantiene en 1.952 g/m<sup>3</sup>; Sustrato disuelto biodegradable (Ss) pasa de 39.040 g/m<sup>3</sup> a 40.885 g/m<sup>3</sup>, lo que supone un posible abultamiento de lodos, fenómeno que aparece en las plantas de tratamiento por lodos activados cuando éstos ocupan un volumen excesivo y no sedimentan fácilmente. La Biomasa Heterótrofa (X<sub>BH</sub>) pasa de 1.952 g/m<sup>3</sup> a 0.364 g/m<sup>3</sup>; el sustrato particulado inerte (Xi) pasa de 1.952 g/m<sup>3</sup> a 0.414 g/m<sup>3</sup> y el sustrato particulado biodegradable (Xs) pasa de 52.704 g/m<sup>3</sup> a 11.000 g/m<sup>3</sup>.

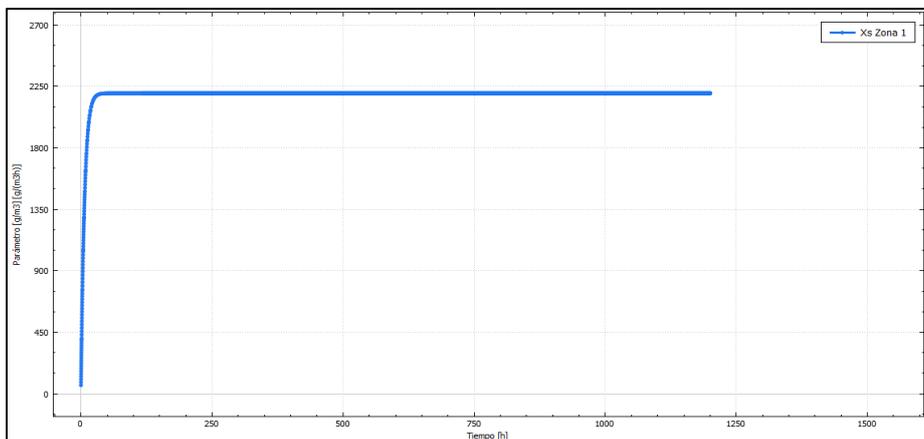
Las gráficas que representan el comportamiento a lo largo de la simulación se muestran a continuación:

En la simulación de cinco días, entre el día dos y tres la carga o sustrato se estabiliza en 40 mg/l por cada mg/l de DQO que entra por cada hora de operación, como se observa en la **Figura 4-8**. Se debe tener en cuenta que la cantidad de sustrato se diluye y es mucho menor al duplicar el caudal de entrada, pasando de 9495.36 m<sup>3</sup>/día a 18.990,72 m<sup>3</sup>/día:



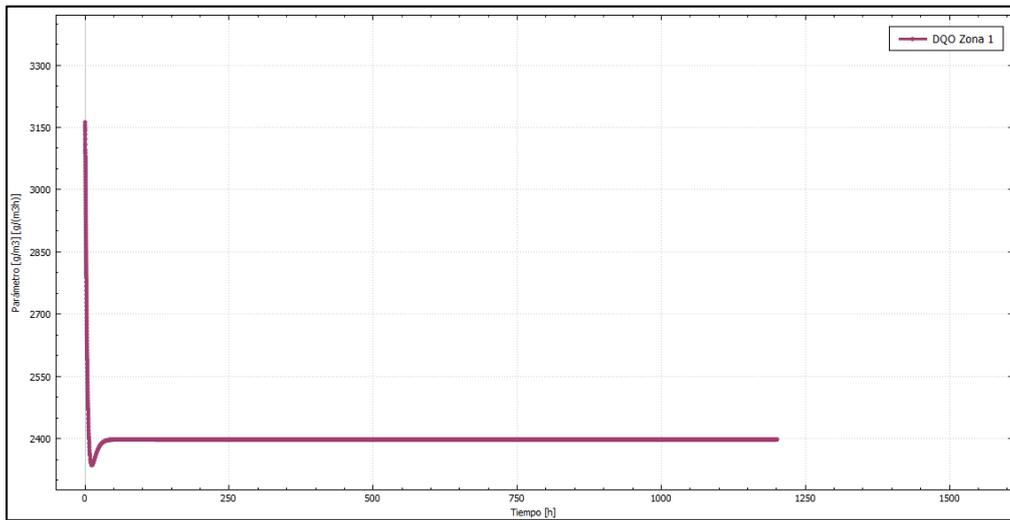
**Figura 4-8.** Gráfica del Sustrato disuelto biodegradable (Ss). Fuente: Software ASM-1.

La concentración de la biomasa en el reactor después de 150 horas, se establece entre 2100 y 2200mg/L, como se muestra en la **Figura 4-9**:



**Figura 4-9.** Gráfica del Sustrato particulado biodegradable (Xs). Fuente: Software ASM-1

La concentración de DQO baja de 3250 a 2400 mg/l por hora oxidada, del cual 1248 mg/l por cada mg/l de agua tratada corresponde al 52% de la biomasa fácilmente biodegradable, como se muestra en la **Figura 4-10**:

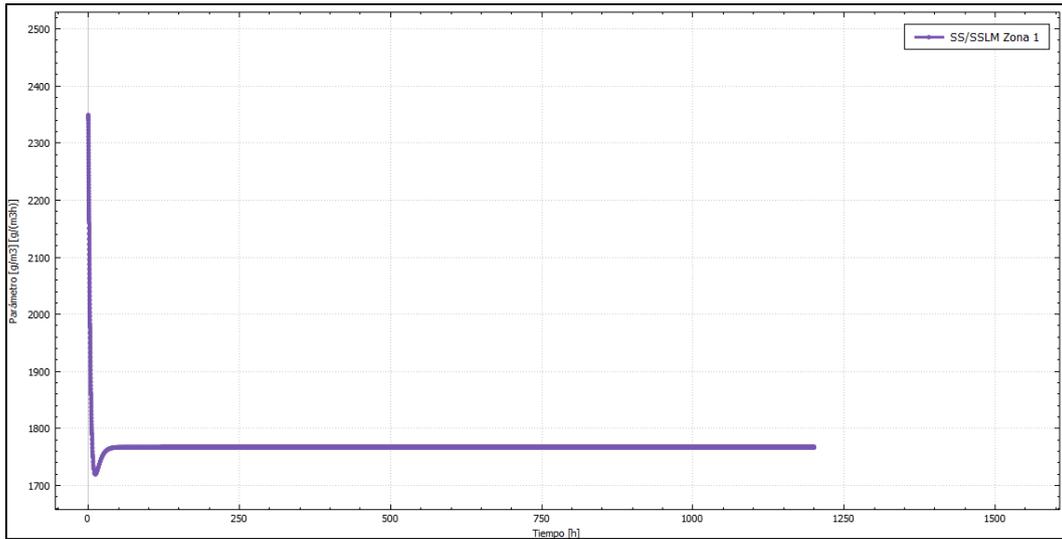


**Figura 4-10.** Gráfica de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Fuente: Software ASM-1

**Tabla 4-2.** Porcentaje de reducción de DQO. Fuente: Elaboración propia.

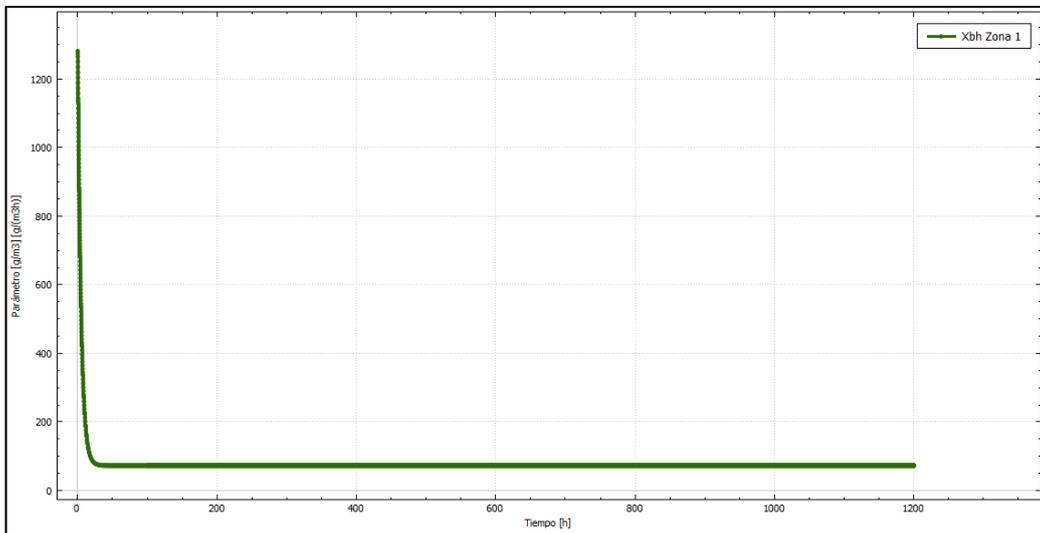
Parámetro	UN	ENTRADA	SALIDA	Referencia del Dato	Porcentaje de remoción
DQO (Demanda Química de Oxígeno) *	g/m3	97.6	53.8	Modelación ASM 1	44.86%

En la **Figura 4-12**, se observa la relación entre los sólidos suspendidos totales y los sólidos en suspensión de licor mezcla. La simulación arroja como resultado que la biomasa lentamente biodegradable corresponde a 356 mg/l.



**Figura 4-11.** Gráfica de la relación del Sustrato disuelto biodegradable ( $S_s$ ) y el Sólidos en Suspensión del Licor Mezcla (SSLM). Fuente: Software ASM-1

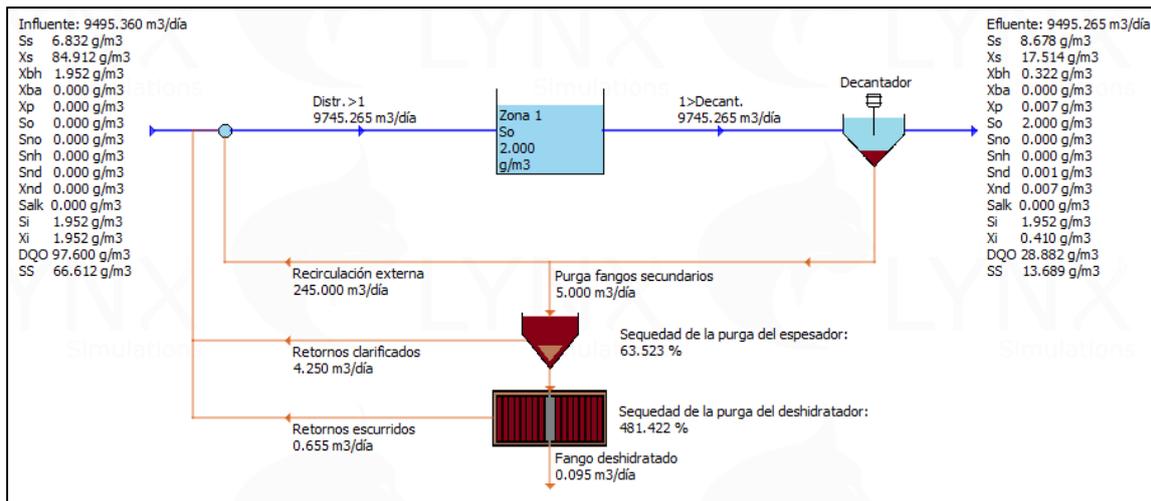
Las bacterias que eliminan la materia orgánica o fácilmente biodegradable son representadas por la biomasa, que de acuerdo a la simulación presenta un valor de 78 mg/l por cada hora de oxígeno suministrado.



**Figura 4-12.** Gráfica de la Biomasa Heterótrofa. Fuente: Software ASM-1

**Escenario 3: FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA CON REDUCCIÓN DE DQO A MENOS DE 30 g/m3**

Como resultado de la simulación se obtuvo la siguiente información:

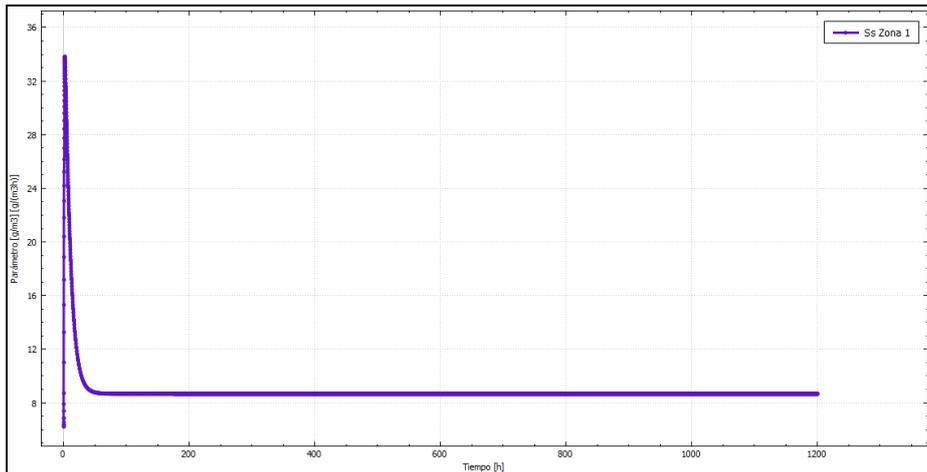


**Figura 4-13.** Escenario No.3. Fuente: Software ASM-1.

Se observa una reducción de DQO del 70.40%, disminuyendo de 97.6 g/m<sup>3</sup> a 28.88 g/m<sup>3</sup>; el Sustrato disuelto inerte(Si) se mantiene en 1.952 g/m<sup>3</sup>; Sustrato disuelto biodegradable (Ss) pasa de 6.832 g/m<sup>3</sup> a 8.678 g/m<sup>3</sup>, lo que supone un posible abultamiento de lodos, fenómeno que aparece en las plantas de tratamiento por lodos activados cuando éstos ocupan un volumen excesivo y no sedimentan fácilmente. La Biomasa Heterótrofa(X<sub>BH</sub>) pasa de 1.952 g/m<sup>3</sup> a 0.322 g/m<sup>3</sup>, el decaimiento recicla la materia orgánica de las células en forma de sustrato particulado biodegradable (Xs) y una pequeña fracción de inertes (Xi); el sustrato particulado inerte(Xi) pasa de 1.952 g/m<sup>3</sup> a 0.410 g/m<sup>3</sup> y el sustrato particulado biodegradable(Xs) pasa de 84.912 g/m<sup>3</sup> a 17.514 g/m<sup>3</sup>, esta hidrólisis produce el Sustrato disuelto biodegradable (Ss) que sirve para sostener el crecimiento de la biomasa heterótrofa, el cual es consumido por la biomasa.

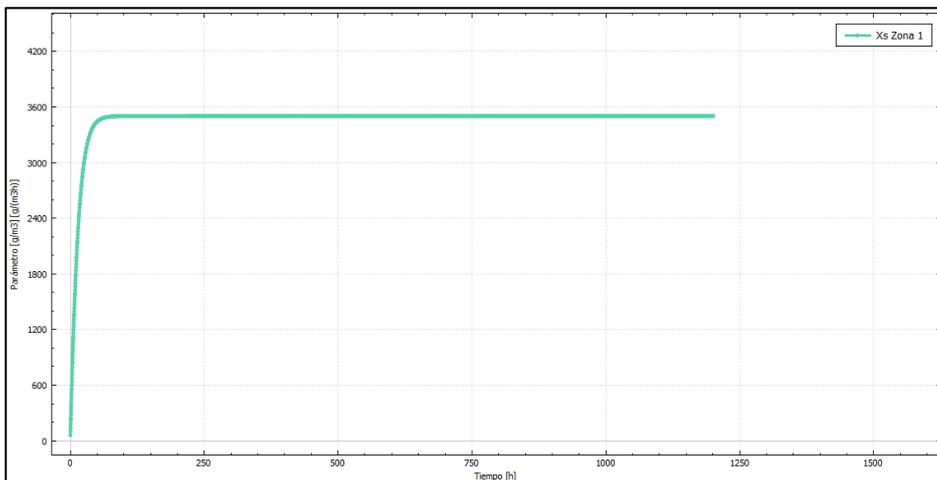
Las gráficas que representan el comportamiento a lo largo de la simulación se muestran a continuación:

En la simulación de cinco días, entre el día dos y tres la carga o sustrato se estabiliza en 8 mg/l por cada mg/l de DQO que entra, como se observa en la **Figura 4-14**:



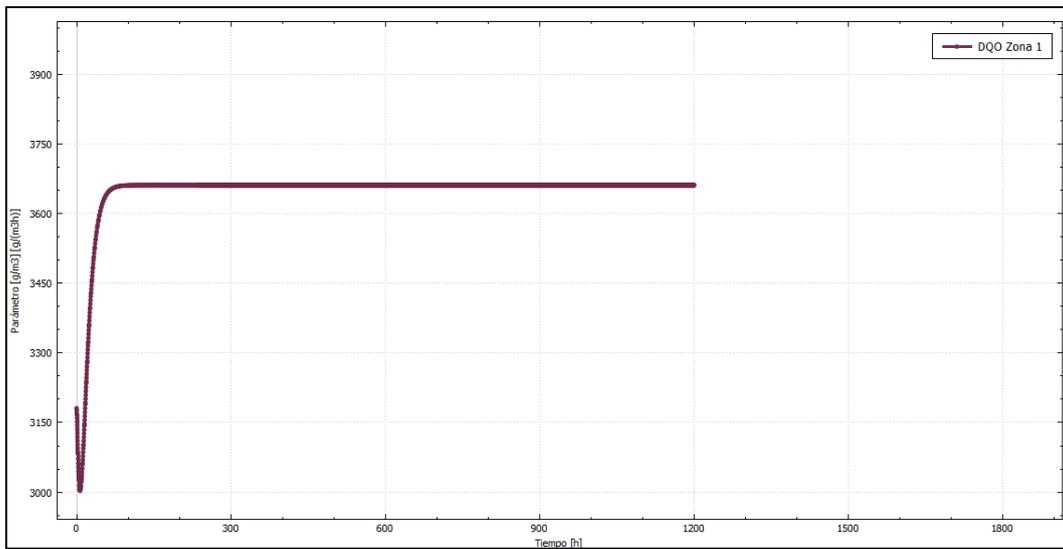
**Figura 4-14.** Gráfica del Sustrato disuelto biodegradable (Ss). Fuente: Software ASM-1.

La concentración de la biomasa en el reactor después de 150 horas, se establece entre 3500 y 3600 mg/L, como se muestra en la **Figura 4-15**:



**Figura 4-15.** Gráfica del Sustrato particulado biodegradable(Xs). Fuente: Software ASM-1

La concentración de DQO en este escenario baja de 3200 a 3000 mg/l y posteriormente aumenta hasta los 3700 mg/l, es importante mencionar que este aumento se genera dentro del reactor, ya que para lograr la disminución deseada a la salida del proceso es necesario aumentar la concentración de biomasa en un 32.208% con respecto al valor de la modelación del escenario #1, de los 3000 mg/l, 2610 mg/l por cada mg/l de agua tratada corresponde al 87% de la biomasa fácilmente biodegradable, como se muestra en la **figura 4-16**:

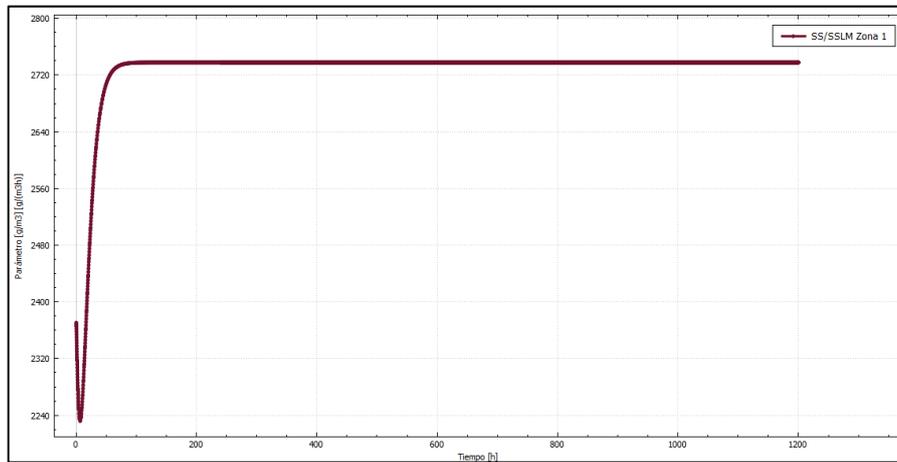


**Figura 4-16.** Gráfica de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Fuente: Software ASM-1

**Tabla 4-3.** Porcentaje de reducción de DQO. Fuente: Elaboración propia.

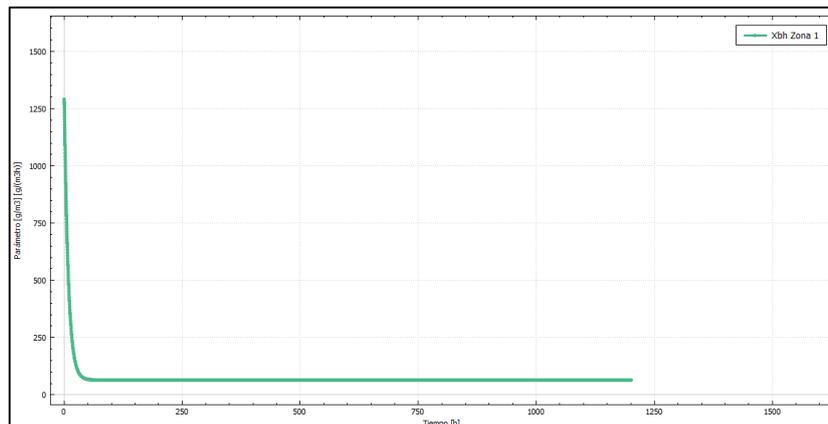
Parámetro	UN	ENTRADA	SALIDA	Referencia del Dato	Porcentaje de remoción
DQO (Demanda Química de Oxígeno) *	g/m3	97.6	28.88	Modelación ASM 1	70.40%

En la **Figura 4-127**, se observa la relación entre los sólidos suspendidos totales y los sólidos en suspensión de licor mezcla. La simulación arroja como resultado que la biomasa lentamente biodegradable corresponde a 140 mg/l.



**Figura 4-17.** Gráfica de la relación del Sustrato disuelto biodegradable (Ss) y el Sólidos en Suspensión del Licor Mezcla (SSLM). Fuente: Software ASM-1

Las bacterias que eliminan la materia orgánica o fácilmente biodegradable son representadas por la biomasa, que de acuerdo a la simulación presenta un valor de 57.8 mg/l por cada hora de oxígeno suministrado. Lo anterior se puede observar en la **Figura 4-18**.



**Figura 4-18.** Gráfica de la Biomasa Heterótrofa. Fuente: Software ASM-1

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El proceso de remoción de materia orgánica llevado a cabo en la PTAR de la universidad Militar Nueva Granada presenta inconvenientes de funcionamiento en la remoción de materia orgánica expresada en términos de DQO debido al abultamiento de lodos que se presenta en su proceso de decantación, lo cual genera cambios en la densidad y permite la creación de fibras que unen las partículas de floc evitando la sedimentación de las mismas, lo cual ocasiona que gran parte de los sólidos suspendidos abandonen el proceso sin ser decantados.

El parámetro fisicoquímico más importante en el desarrollo de este estudio fue la DQO obtenida de los ensayos de laboratorio y el posterior fraccionamiento de la misma, determinando la composición porcentual de los factores relevantes en el proceso, para ser ingresados y lograr la calibración del modelo de manera que la simulación del escenario principal se asemeje a la realidad del funcionamiento actual del proceso, el cual presenta un porcentaje de remoción del 45.28 % y el porcentaje de remoción obtenido teóricamente producto de la simulación fue del 44.33 %, lo cual permite evidenciar un comportamiento muy cercano permitiendo concluir de la calibración del modelo fue exitosa.

En el eventual aumento del caudal en el afluente del proceso se hace necesario contemplar el aumento de biomasa en el reactor y mayor recirculación de lodo jóvenes para que la dilución de la materia orgánica no entorpezca la remoción de la misma, ya que a mayor volumen de agua con las mismas condiciones en la población de biomasa se presentará menor alimento disponible para las bacterias que realizan el proceso retardando y disminuyendo la eficiencia del proceso.

Se plantearon dos escenarios adicionales en los cuales se pudo determinar en primer lugar que la dilución de la materia orgánica es inversamente proporcional a la degradación de esta, lo

anterior debido a que al doblar el caudal de entrada al proceso, pasando de 9495.36 m<sup>3</sup>/día a 18.990,72 m<sup>3</sup>/día, la remoción disminuye aun cuando se conservan las condiciones iniciales.

La remoción teórica de la PTAR debería estar en un rango no superior a los 30 mg/l en el efluente del proceso, motivo por el cual se planteó el escenario 3 en el cual se considera un aumento del 32.208% respecto a la modelación obtenida con la calibración inicial del modelo del sustrato particulado biodegradable, generando de esta manera una simulación acorde a los resultados esperados. Adicional a lo anterior es posible determinar que para lograr una remoción mayor y presentar la eficiencia deseada, es necesario aumentar el volumen útil del reactor.

La optimización de un proceso con tantas variables implícitas en él, necesita de un seguimiento muy riguroso para la aplicación de herramientas matemáticas que permitan la toma de decisiones, se recomienda el planteamiento de un procedimiento el cual contemple la toma y el registro de los parámetros necesarios para realizar una modelación acorde a la realidad, de esa manera el modelo presentara una eficiencia mucho más alta beneficiando el proceso a largo plazo.

El efecto del abultamiento de lodos presenta problemas graves en la cuantificación de los valores de remoción de materia orgánica, es necesario adelantar acciones que disminuyan y controlen este problema, lo cual se verá reflejado a corto, mediano y largo plazo en la eficiencia de remoción de materia orgánica y solidos suspendidos, una manera de atacar el problema el cual se presenta cuando existe un alto grado de bacterias filamentosas, para ello se recomienda usar hipoclorito para eliminar la sobrepoblación de dichas bacterias.

## BIBLIOGRAFÍA

- AHNERT, M. RIEGER, L. A guideline for simulation studies of wastewater treatment plants. *Water Science & Technology*. Article. 2004.
- BATSTONE, KELLER, I. ANGELIDAKI, KALYUZHNYI, S.G. PAVLOSTATHIS, ROZZI, W.T.M., SIEGRIST, VAVILIN. The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Science & Technology* Vol 45 No 10, 2002, 65–73p.
- DOLD, P.L., EKAMA, G.A. & MARAIS, G.V.R. (1986). “Evaluation of the general activated sludge model proposed by the IAWPRC task group”. *Water Science and Technology*, vol. 18, 63-89.
- FALL, Cheikh. DÍAZ-DELGADO, Carlos. CHÁVEZ ROMERO, Rafael. Modelación matemática de plantas de tratamiento de lodos activados. *Revista Técnica de Medio Ambiente RETEMA*, España, Vol. 110, 2006. 32-47 p.
- GOEL, R. YASUI, H. LI, Y. Evaluation of state variable interface between the Activated Sludge Models and Anaerobic Digestion Model No.1. *Water Science & Technology* Article. 2008.
- GUJER, W. Henze, M. *Activated Sludge Modelling and Simulation*. Swiss Federal Institute for Water Resources and Water Pollution Control (EAWAG), Dübendorf, Switzerland, 1991.
- HENZE, Mogens. GUJER, W., MINO, T. VAN LOOSDRECHT. *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*, IWA Publishing, London, UK, 2002, 130 p.
- LANGERGRABER, REIJER, WINKLER, WEISE, OWERDIECK, AHNERT, SIMON, MAURER. A guideline for simulation studies of wastewater treatment plants. *Water Science & Technology*, Vol. 50 (7), 2004, 131-138 p.
- LEVENSPIEL, O. *Ingeniería de las Reacciones Químicas*. Editorial Reverté. Barcelona, España. 1998. 638 p.

- LOAIZA NAVÍA. CHEIKH. Modelación del proceso de lodos activados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Noreste, Apodaca, N.L. Ciencia UANL, Vol. XIII, Núm. 1, enero-marzo, Universidad Autónoma de Nuevo León México, 2010, 46-54 p.
- Manual de operación y funcionamiento de la Planta de tratamiento de aguas residuales domesticas para la UMNG Sede Cajicá – Módulo Uno. 2008.
- METCALF & EDDY INC. TCHOBANOGLOUS, G. BURTON, F. STENSEL, D. Wastewater engineering: Treatment, Disposal & Reuse, Mc Graw Hill, 4ta Edición, 2003.
- MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Viceministerio del Agua. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico y Resolución 330 de 2017.
- MOLINA, J. Modelamiento de las condiciones hidráulicas de una Planta compacta para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2010. 16-17p.
- NAVA, H. BAUMANN, J. Remoción de bacterias coliformes en un sistema de lodos activados y humedal construido. Facultad de Agrobiología. Universidad Autónoma de Taxcala, México. Artículo. 2016.
- PETERSEN, GERNAEY, HENZE and VANROLLEGHEM. Evaluation of an ASM1 model calibration procedure on a municipal-industrial WWTP, Journal Hydroinformatics IWA 4, 2002, 15- 38p.
- REY, H. IGELMO, M. ZORNOZA, A. Experiencia piloto de simulación para la mejora del rendimiento de eliminación del nitrógeno en EDAR. Instituto Universitario de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente IIAMA. Universidad Politécnica de Valencia.
- SEDRAN, M. MEHROTRA, A. PINCINCE, A. The Dangers of uncalibrated activated sludge simulations packages. Water Enviroment Foundation. 2006.
- SPANGERS, H.. TAKAKS I, BROUWER H. Direct Parameter Extraction fromRespirograms for Wastewater and BiomassCharacterization. Water Science & Techno-logy, Vol. 39 (4), 1999, 137-145p.

- SPERLING, V. Principios del Tratamiento Biológico de Aguas residuales. Lodos Activados. Traducción de Iván Andres Sanchez Ortiz, Universidad de Nariño. 2014.
- VANROLLEGHEM, P.A., SPANGERS, H., PETERSEN, GINESTET P., TAKAKS I. Estimating Activated Sludge Model No 1, Parameters and Components by Respirometry. Water Science & Technology, Vol. 39 (1), 1999, 195-214p.
- WERF, Methods for wastewater characterization in activated sludge modelling, Water Environment Research Federation (WERF), Alexandria, VA, WERF publication N° 9 WWF3, 2003, 1ª Ed, 596 p.