

Desarrollo del Modelo IWA ASM1 para 1 y 2 Reactores Utilizando MATLAB: Aplicaciones en el Diseño de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales

Development of the IWA ASM1 Model for 1 and 2 Reactors Using MATLAB: Applications in the Design of Wastewater Treatment Systems

David Moncada Torres¹ ; Luis Moncada Albitres² 

RESUMEN

En este artículo, se presenta el desarrollo y la implementación del modelo IWA ASM1 (Activated Sludge Model No. 1) utilizando MATLAB, una herramienta poderosa para el análisis y diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales. El modelo ASM1 se utiliza ampliamente para simular el comportamiento de los reactores biológicos utilizados en el tratamiento de aguas residuales. Se exploran las ecuaciones y parámetros del modelo, así como su adaptación para sistemas de uno y dos reactores. Además, se presentan ejemplos de aplicaciones prácticas del modelo en el diseño y optimización de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Palabras clave: tratamiento de aguas residuales, modelo IWA ASM1, MATLAB, reactores biológicos, diseño de sistemas.

ABSTRACT

This article presents the development and implementation of the IWA ASM1 (Activated Sludge Model No. 1) model using MATLAB, a powerful tool for the analysis and design of wastewater treatment systems. The ASM1 model is widely used to simulate the behavior of biological reactors used in wastewater treatment. The equations and parameters of the model are explored, as well as its adaptation for one and two-reactor systems. Additionally, examples of practical applications of the model in the design and optimization of wastewater treatment systems are presented.

Keywords: wastewater treatment, IWA ASM1 model, MATLAB, biological reactors, system design.

1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento efectivo de aguas residuales desempeña un papel crucial en la preservación del medio ambiente y en la protección de la salud pública. En este contexto, el modelo IWA ASM1, desarrollado por la Asociación Internacional del Agua (IWA), se convierte en una herramienta de gran valor para comprender y simular el comportamiento de los reactores biológicos utilizados en los procesos de tratamiento de aguas residuales. Además, el uso de MATLAB como plataforma para implementar este modelo ofrece numerosas ventajas, incluyendo mayor flexibilidad y precisión en el análisis y diseño de sistemas de tratamiento.

En un proceso típico de lodos activados, se emplean dos unidades principales: el tanque de aireación (también conocido como cuenca) y el clarificador secundario (tanque de sedimentación). La interacción entre estas dos unidades es fundamental para lograr un tratamiento eficiente de las aguas residuales. Desde la parte inferior del clarificador secundario, los lodos sedimentados y concentrados son devueltos al tanque de aireación. Este proceso de recirculación garantiza que los sólidos suspendidos en el licor mixto (MLSS) se mantengan en los niveles deseados.

Un aspecto esencial para considerar en la operación de sistemas de lodos activados es la gestión del exceso de

¹ Universidad Nacional de Trujillo, Ciudad Trujillo, País Perú. lmoncadat@unitru.edu.pe

² Universidad Nacional de Trujillo, Ciudad Trujillo, País Perú. lmoncada@unitru.edu.pe

lodo generado diariamente. Este exceso de lodo se elimina de la línea de lodo de retorno y, con frecuencia, se dirige a un espesador de lodo. La finalidad de este proceso es mantener el sistema funcionando de acuerdo con un ciclo de lodo controlado, lo que se expresa en términos de dos parámetros clave: el tiempo de retención celular (MCRT) o el tiempo de retención de lodo (SRT).

El manejo adecuado de estos parámetros es crucial para garantizar un funcionamiento óptimo del sistema de tratamiento de aguas residuales. Un MCRT o SRT inadecuado puede afectar negativamente la eficiencia de eliminación de contaminantes y, en última instancia, aumentar los costos operativos. Por lo tanto, la optimización y control de estos factores son elementos esenciales en el diseño y operación efectiva de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Exploraremos la implementación del modelo IWA ASM1 en MATLAB y analizaremos dos ejemplos prácticos de aplicaciones en la ingeniería de aguas residuales. Estos ejemplos proporcionarán una visión más completa de cómo esta combinación de herramientas puede revolucionar el diseño y la gestión de sistemas de tratamiento de aguas residuales, contribuyendo así a un impacto positivo en el medio ambiente y la salud pública.

1.1 Modelo ASM1

El modelo ASM1 (Activated Sludge Model No 1) es una herramienta fundamental en la simulación de los procesos biológicos en reactores de lodos activos utilizados en sistemas de tratamiento de aguas residuales. Desarrollado por Henze et al. en 1987, este modelo se ha consolidado como el estándar de la industria debido a su combinación de simplicidad y precisión en la representación de la compleja interacción entre las diversas especies presentes en estos reactores.

El ASM1 abarca tres procesos biológicos de vital importancia en el tratamiento de aguas residuales: la remoción de materia orgánica, la nitrificación y la desnitrificación. Este enfoque integral permite modelar y comprender la dinámica de los componentes químicos y biológicos presentes en el sistema de tratamiento.

En términos más técnicos, el modelo ASM1 considera ocho procesos distintos, trece componentes químicos y catorce parámetros cinéticos, además de cinco parámetros estequiométricos. Estos elementos son esenciales para describir con precisión la evolución de las sustancias en el sistema de tratamiento de aguas residuales.

Los ocho procesos contemplados por el modelo ASM1 son los siguientes:

- **Crecimiento heterótrofo aeróbico:** Representa el crecimiento de microorganismos heterótrofos en condiciones aeróbicas.
- **Crecimiento heterótrofo anóxico:** Simula el crecimiento de microorganismos heterótrofos en condiciones anóxicas, donde el oxígeno no está presente.
- **Crecimiento autótrofo aeróbico:** Describe el crecimiento de microorganismos autótrofos en un entorno aeróbico.
- **Decaimiento heterótrofo:** Modela la disminución de la biomasa de microorganismos heterótrofos.
- **Decaimiento autótrofo:** Simula la pérdida de biomasa de microorganismos autótrofos.
- **Amonificación de nitrógeno orgánico soluble:** Representa la conversión de nitrógeno orgánico soluble en amoníaco.
- **Hidrólisis de orgánicos atrapados:** Describe la descomposición de materia orgánica atrapada en partículas.
- **Hidrólisis de nitrógeno orgánico atrapado:** Modela la descomposición de nitrógeno orgánico atrapado en partículas.

La base teórica para el desarrollo de las ecuaciones de balance de materia en el modelo ASM1 se deriva de la "Matriz de Petersen", que fue trabajada y perfeccionada por Henze et al. en su modelo ASM1 de 1987. Esta matriz sirve como un cimiento sólido para la representación matemática de los procesos biológicos y químicos en el tratamiento de aguas residuales.

Los ocho procesos contemplados por el modelo ASM1, descritos previamente, se representan mediante las siguientes ocho ecuaciones:

$$\rho_1 = \mu_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H} \quad (1)$$

$$\rho_2 = \mu_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \eta_g X_{B,H} \quad (2)$$

$$\rho_3 = \mu_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) X_{B,A} \quad (3)$$

$$\rho_4 = b_H X_{B,H} \quad (4)$$

$$\rho_5 = b_A X_{B,A} \quad (5)$$

$$\rho_6 = k_A S_{ND} X_{B,H} \quad (6)$$

$$\rho_7 = k_h \frac{X_S / X_{B,H}}{K_X + X_S / X_{B,H}} \left[\left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) + \eta_h \left(\frac{S_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right] X_{B,H} \quad (7)$$

$$\rho_8 = k_h \left[\left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) + \eta_h \left(\frac{S_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right] X_{B,H} (X_{ND} / X_S) \quad (8)$$

Las componentes del modelo ASM1 se describen a continuación:

1. **Materia orgánica soluble inerte (S_i):** Se refiere a la fracción de materia orgánica soluble que es resistente a la degradación biológica. Esta fracción no contribuye significativamente a los procesos biológicos de tratamiento y puede acumularse en el sistema.
2. **Sustrato rápidamente biodegradable (S_s):** Es una fracción de materia orgánica soluble que es altamente biodegradable. Los microorganismos pueden consumir esta materia orgánica de manera eficiente para su crecimiento y reproducción.
3. **Materia orgánica particulada inerte (X_i):** Representa la fracción de materia orgánica que se encuentra en partículas sólidas y que no se biodegrada fácilmente. Esta materia orgánica inerte no participa activamente en los procesos biológicos y puede contribuir al contenido de sólidos en suspensión.
4. **Sustrato lentamente biodegradable (X_s):** Es una fracción de materia orgánica que se degrada más lentamente en comparación con el S_s. Requiere más tiempo y actividad microbiana para su descomposición.
5. **Biomasa activa heterótrofa (X_{BH}):** Representa la concentración de microorganismos heterótrofos activos que desempeñan un papel fundamental en la degradación de la materia orgánica.
6. **Biomasa activa autótrofa (X_{BA}):** Se refiere a la concentración de microorganismos autótrofos activos, que están involucrados en la nitrificación y utilizan compuestos inorgánicos como fuente de energía.
7. **Partícula producto del decaimiento de biomasa (X_p):** Es la fracción de biomasa que se genera como producto del decaimiento de otros microorganismos. Puede contribuir a la producción de sólidos en suspensión.
8. **Oxígeno disuelto (S_o):** Representa la concentración de oxígeno molecular disuelto en el agua. El oxígeno es esencial para los procesos aeróbicos de tratamiento, como el crecimiento microbiano y la oxidación de contaminantes.
9. **Nitrógeno como nitrato o nitrito (S_{NO}):** Se refiere a la concentración de nitrógeno inorgánico en forma de nitrato o nitrito, que puede estar presente en el sistema como resultado de procesos de nitrificación.
10. **Nitrógeno como amoníaco o amonio (S_{NH}):** Representa la concentración de nitrógeno inorgánico en forma de amoníaco o amonio. Es una forma de nitrógeno que puede ser utilizada por microorganismos o eliminada a través de procesos de desnitrificación.
11. **Nitrógeno orgánico soluble biodegradable (S_{ND}):** Se refiere a la fracción de nitrógeno orgánico que es soluble y biodegradable. Puede ser consumido por microorganismos en procesos de degradación.
12. **Nitrógeno orgánico particulado biodegradable (X_{ND}):** Es la fracción de nitrógeno orgánico que se encuentra en partículas sólidas y es biodegradable. Los microorganismos pueden descomponer esta fracción.
13. **Alcalinidad (S_{ALK}):** Representa la concentración de alcalinidad en el sistema. La alcalinidad es importante para mantener el equilibrio del pH en el proceso y puede estar influenciada por la generación de ácidos y bases durante las reacciones químicas y biológicas.

Las tasas de conversión, siguiendo el orden de la lista anterior, para los diferentes componentes del proceso son:

$$r_1 = 0 \quad (9)$$

$$r_2 = -\frac{1}{Y_H} \rho_1 - \frac{1}{Y_H} \rho_2 + \rho_7 \quad (10)$$

$$r_3 = 0 \quad (11)$$

$$r_4 = (1 - f_P) \rho_4 + (1 - f_P) \rho_5 - \rho_7 \quad (12)$$

$$r_5 = \rho_1 + \rho_2 - \rho_4 \quad (13)$$

$$r_6 = \rho_3 - \rho_5 \quad (14)$$

$$r_7 = f_P \rho_4 + f_P \rho_5 \quad (15)$$

$$r_8 = -\frac{1-Y_H}{Y_H} \rho_1 - \frac{4.57-Y_A}{Y_A} \rho_3 \quad (16)$$

$$r_9 = -\frac{1-Y_H}{2.86Y_H} \rho_2 - \frac{1}{Y_A} \rho_3 \quad (17)$$

$$r_{10} = -i_{XB} \rho_1 - i_{XB} \rho_2 - \left(i_{XB} + \frac{1}{Y_H}\right) \rho_3 + \rho_6 \quad (18)$$

$$r_{11} = -\rho_6 + \rho_8 \quad (19)$$

$$r_{12} = (i_{XB} - f_P i_{XB}) \rho_4 + (i_{XB} - f_P i_{XB}) \rho_5 - \rho_8 \quad (20)$$

$$r_{13} = -\frac{i_{XB}}{14} \rho_1 + \left(\frac{1-Y_H}{14 \cdot 2.86Y_H} - \frac{i_{XB}}{14}\right) \rho_2 - \left(\frac{i_{XB}}{14} - \frac{1}{7Y_A}\right) \rho_3 + \frac{1}{14} \rho_6 \quad (21)$$

Los parámetros cinéticos y estequiométricos son elementos clave en el modelo ASM1 para describir las tasas de reacción y las relaciones estequiométricas en los procesos de tratamiento de aguas residuales.

Los valores de los parámetros del modelo ASM1 pueden variar según las características específicas de un sistema de tratamiento de aguas residuales y las condiciones ambientales. Por lo general, estos valores se obtienen a través de experimentos de laboratorio, pruebas piloto o datos de sistemas de tratamiento reales. La calibración y ajuste de los parámetros son procesos fundamentales para que el modelo se ajuste de manera precisa a un sistema particular.

Parámetros cinéticos:

1. **Tasa de crecimiento máximo heterótrofo (μ_H)** : Representa la máxima tasa de crecimiento que pueden alcanzar los microorganismos heterótrofos en condiciones aeróbicas. Valores típicos en el rango de 0.1 a 1.0 día⁻¹.
2. **Tasa de crecimiento máximo autótrofo (μ_A)** : Indica la máxima tasa de crecimiento de los microorganismos autótrofos en condiciones aeróbicas. Valores típicos en el rango de 0.05 a 0.3 día⁻¹.
3. **Constante de saturación por sustrato biodegradable (K_S)** : Representa la concentración de sustrato biodegradable en la que la tasa de crecimiento es la mitad de la tasa máxima. Valores típicos en el rango de 5 a 30 mg/L.
4. **Constante heterótrofa de saturación por oxígeno ($K_{O,H}$)** : Indica la concentración de oxígeno disuelto en la que la tasa de crecimiento de microorganismos heterótrofos se reduce a la mitad de su valor máximo. Valores típicos en el rango de 0.2 a 2.0 mg O₂/L.
5. **Constante de saturación por nitrógeno como nitrito o nitrato (K_{NO})** : Representa la concentración de nitrógeno en forma de nitrito o nitrato en la que la tasa de crecimiento se reduce a la mitad de su máximo. Valores típicos en el rango de 0.1 a 1.0 mg N/L.
6. **Tasa de decaimiento heterótrofo (b_H)** : Indica la tasa de decaimiento de los microorganismos heterótrofos. Valores típicos en el rango de 0.05 a 0.2 día⁻¹.
7. **Constante autótrofa de saturación por oxígeno ($K_{O,A}$)** : Representa la concentración de oxígeno disuelto en la que la tasa de crecimiento de los microorganismos autótrofos se reduce a la mitad de su valor máximo. Valores típicos en el rango de 0.1 a 2.0 mg O₂/L.
8. **Constante autótrofa de saturación por amina, amoníaco o nitrógeno (K_{NH})** : Indica la concentración de nitrógeno en forma de amina o amoníaco en la que la tasa de crecimiento de los microorganismos autótrofos se reduce a la mitad de su máximo. Valores típicos en el rango de 0.1 a 5.0 mg N/L.
9. **Tasa de Decaimiento Autótrofo (b_A)** : Representa la tasa de decaimiento de los microorganismos autótrofos. Su valor puede variar según las condiciones del sistema y la concentración de microorganismos autótrofos.
10. **Factor de corrección para crecimiento heterótrofo anóxico (η_g)** : Es un factor que corrige la tasa de crecimiento heterótrofo en condiciones anóxicas (sin oxígeno). Su valor es específico para el sistema y puede variar según las condiciones de oxigenación.

11. **Factor de corrección para hidrólisis (η_h)** : Es un factor que corrige la tasa de hidrólisis, que es el proceso de descomposición de compuestos orgánicos atrapados en partículas. Su valor depende de las características del sistema y la eficiencia de la hidrólisis.
12. **Amonificación (k_s)** : Representa la tasa de conversión de nitrógeno orgánico soluble en amoníaco. Su valor es específico para el sistema y puede variar según las condiciones de nitrificación y descomposición.
13. **Hidrólisis (k_h, K_x)** : La tasa de hidrólisis y la constante de saturación en la ecuación de hidrólisis, que describe la descomposición de materia orgánica atrapada. Estos valores son específicos para el sistema y dependen de la eficiencia de la hidrólisis.

Parámetros estequiométricos:

1. **Rendimiento heterótrofo (Y_H)** : Representa la cantidad de biomasa heterótrofa producida por unidad de materia orgánica biodegradable consumida. Valores típicos en el rango de 0.3 a 0.7 g SS/g COD.
2. **Rendimiento autótrofo (Y_A)** : Indica la cantidad de biomasa autótrofa producida por unidad de sustrato inorgánico consumido. Valores típicos en el rango de 0.1 a 0.3 g SS/g COD.
3. **Fracción de producto inerte (f_p)** : Es la fracción de la biomasa producida que se considera inerte, es decir, que no participa en los procesos de reacción. Valores típicos en el rango de 0.1 a 0.4.
4. **Razón de nitrógeno en la DQO de la biomasa (i_{XB})** : Representa la relación entre la cantidad de nitrógeno y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de la biomasa. Valores típicos en el rango de 0.05 a 0.15.
5. **Razón de nitrógeno en la DQO del producto de la biomasa (i_{XB})** : Indica la relación entre la cantidad de nitrógeno y la DQO del producto de la biomasa. Valores típicos en el rango de 0.03 a 0.1.

1.1.1. Ecuaciones de balance de materia

Se realiza un balance de materia para cada uno de los 13 componentes. Siendo que la concentración de cada componente se ve afectada por el número de procesos en los que participa, es necesario resolver las ecuaciones cómo un sistema, teniendo un sistema de 13 ecuaciones diferenciales

$$\frac{dS_I}{dt} = (Q/V) \cdot (S_{I_{in}} - S_{I_{out}}) + r_1 \quad (22)$$

$$\frac{dS_S}{dt} = (Q/V) \cdot (S_{S_{in}} - S_{S_{out}}) + r_2 \quad (23)$$

$$\frac{dX_I}{dt} = (Q/V) \cdot (X_{I_{in}} - X_{I_{out}}) + r_3 \quad (24)$$

$$\frac{dX_S}{dt} = (Q/V) \cdot (X_{S_{in}} - X_{S_{out}}) + r_4 \quad (25)$$

$$\frac{dX_{B,H}}{dt} = (Q/V) \cdot (X_{B,H_{in}} - X_{B,H_{out}}) + r_5 \quad (26)$$

$$\frac{dX_{B,A}}{dt} = (Q/V) \cdot (X_{B,A_{in}} - X_{B,A_{out}}) + r_6 \quad (27)$$

$$\frac{dX_P}{dt} = (Q/V) \cdot (X_{P_{in}} - X_{P_{out}}) + r_7 \quad (28)$$

$$\frac{dS_O}{dt} = (Q/V) \cdot (S_{O_{in}} - S_{O_{out}}) + r_8 \quad (29)$$

$$\frac{dS_{NO}}{dt} = (Q/V) \cdot (S_{NO_{in}} - S_{NO_{out}}) + r_9 \quad (30)$$

$$\frac{dS_{NH}}{dt} = (Q/V) \cdot (S_{NH_{in}} - S_{NH_{out}}) + r_{10} \quad (31)$$

$$\frac{dS_{ND}}{dt} = (Q/V) \cdot (S_{ND_{in}} - S_{ND_{out}}) + r_{11} \quad (32)$$

$$\frac{dX_{ND}}{dt} = (Q/V) \cdot (X_{ND_{in}} - X_{ND_{out}}) + r_{12} \quad (33)$$

$$\frac{dS_{ALK}}{dt} = (Q/V) \cdot (S_{ALK_{in}} - S_{ALK_{out}}) + r_{13} \quad (34)$$

Las ecuaciones 22 al 34 representan el sistema de ecuaciones diferenciales que describen el balance de materia para cada uno de los 13 componentes en el modelo ASM1. Cada ecuación tiene una estructura similar y describe cómo la concentración de un componente en particular cambia con el tiempo debido a la entrada y salida del componente, así como a los procesos biológicos y químicos que afectan su concentración.

El sistema de ecuaciones diferenciales es fundamental para simular y comprender el comportamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales y cómo las concentraciones de los componentes evolucionan con el tiempo. Para resolver este sistema de ecuaciones, se requiere utilizar software o herramientas de programación numérica, como MATLAB, que pueden manejar ecuaciones diferenciales y realizar cálculos numéricos.

En este sistema de ecuaciones, las diferenciales representan las tasas de cambio de las concentraciones de los componentes con respecto al tiempo. Las r_1 a r_{13} representan las tasas de los procesos bioquímicos y químicos que afectan a cada componente.

Resolver este sistema de ecuaciones permitirá simular el comportamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales y estudiar cómo los cambios en los parámetros cinéticos y estequiométricos afectan la eficiencia del tratamiento y la calidad del efluente.

2. DESCRIPCIÓN DEL CASO

2.1. CASO 1: Un Reactor

Para el primer caso se considera un afluente con un flujo de 250m³/día que ingresa a un punto de mezcla con una recirculación interna de 250m³/día para luego ingresar a razón de 500m³/día al reactor anóxico de 91 m³ con una concentración de oxígeno disuelto en el agua (SO) constante, con un valor de 0. La salida de este reactor se divide en 2 corrientes de 250m³/día cada una, siendo una de estas la recirculación interna mencionada previamente. La salida del reactor que no recircula ingresa finalmente a un decantador, del cual sale nuestro efluente.

Las condiciones iniciales de nuestro reactor son:

- Materia orgánica soluble inerte (S_I): 20 g COD/m³
- Sustrato rápidamente biodegradable (S_S): 10 g COD/m³
- Materia orgánica particulada inerte (X_I): 350 g COD/m³
- Sustrato lentamente biodegradable (X_S): 50 g COD/m³
- Biomasa activa heterótrofa (X_{BH}): 1300 g COD/m³
- Biomasa activa autótrofa (X_{BA}): 70 g COD/m³
- Partícula producto del decaimiento de biomasa (X_P): 1400 g N/m³
- Nitrógeno como nitrato o nitrito (S_{NO}): 5 g NO₃-N/m³
- Nitrógeno como amoníaco o amonio (S_{NH}): 5 g NH₃-N/m³
- Nitrógeno orgánico soluble biodegradable (S_{ND}): 0.5 g N/m³
- Nitrógeno orgánico particulado biodegradable (X_{ND}): 4 g N/m³
- Alcalinidad (S_{ALK}): 100 g COD/m³

Los valores de nuestra agua residual son:

- Materia orgánica soluble inerte (S_I): 21 g COD/m³
- Sustrato rápidamente biodegradable (S_S): 241.5 g COD/m³
- Materia orgánica particulada inerte (X_I): 15.7 g COD/m³
- Sustrato lentamente biodegradable (X_S): 225.7 g COD/m³
- Biomasa activa heterótrofa (X_{BH}): 0 g COD/m³
- Biomasa activa autótrofa (X_{BA}): 0 g COD/m³
- Partícula producto del decaimiento de biomasa (X_P): 0 g N/m³
- Nitrógeno como nitrato o nitrito (S_{NO}): 0.85 g NO₃-N/m³
- Nitrógeno como amoníaco o amonio (S_{NH}): 45.9 g NH₃-N/m³
- Nitrógeno orgánico soluble biodegradable (S_{ND}): 7.2 g N/m³
- Nitrógeno orgánico particulado biodegradable (X_{ND}): 6.77 g N/m³
- Alcalinidad (S_{ALK}): 100 g COD/m³

2.2. CASO 2: Dos reactores

Para el segundo caso se dispuso dos reactores en serie denominados Zona 1 (Sección Anóxica) y Zona 2 (Sección Aeróbica), para un afluente con un flujo de 250m³/día que ingresa a un punto de mezcla con una recirculación interna de 250m³/día para luego ingresar a razón de 500m³/día a la Zona 1, cuya salida ingresa a la Zona 2 del cual la salida se divide en 2 corrientes de 250m³/día cada una, siendo una de estas la recirculación interna mencionada previamente. La salida de la zona 2 que no recircula ingresa finalmente a un decantador, del cual sale nuestro efluente. El volumen de nuestro reactor en la Zona 1 es de 91 m³ con un valor de SO igual a 0, mientras que el volumen de nuestro reactor en la Zona 2 es de 128 m³ en el que se considera el oxígeno disuelto en el agua (SO) con un valor de 2 g/m³.

Las condiciones iniciales de nuestro reactor de la **Zona 1** son:

- Materia orgánica soluble inerte (SI): 20 g COD/m³
- Sustrato rápidamente biodegradable (SS): 10 g COD/m³
- Materia orgánica particulada inerte (XI): 350 g COD/m³
- Sustrato lentamente biodegradable (Xs): 50 g COD/m³
- Biomasa activa heterótrofa (XBH): 1300 g COD/m³
- Biomasa activa autótrofa (XBA): 70 g COD/m³
- Partícula producto del decaimiento de biomasa (Xp): 1400 g N/m³
- Nitrógeno como nitrato o nitrito (SNO): 5 g NO₃-N/m³
- Nitrógeno como amoníaco o amonio (SNH): 5 g NH₃-N/m³
- Nitrógeno orgánico soluble biodegradable (SND): 0.5 g N/m³
- Nitrógeno orgánico particulado biodegradable (XND): 4 g N/m³
- Alcalinidad (SALK): 100 g COD/m³

Las condiciones iniciales de nuestro reactor de la **Zona 2** son:

- Materia orgánica soluble inerte (SI): 20 g COD/m³
- Sustrato rápidamente biodegradable (SS): 10 g COD/m³
- Materia orgánica particulada inerte (XI): 350 g COD/m³
- Sustrato lentamente biodegradable (Xs): 50 g COD/m³
- Biomasa activa heterótrofa (XBH): 1300 g COD/m³
- Biomasa activa autótrofa (XBA): 70 g COD/m³
- Partícula producto del decaimiento de biomasa (Xp): 1400 g N/m³
- Nitrógeno como nitrato o nitrito (SNO): 5 g NO₃-N/m³
- Nitrógeno como amoníaco o amonio (SNH): 5 g NH₃-N/m³
- Nitrógeno orgánico soluble biodegradable (SND): 0.5 g N/m³
- Nitrógeno orgánico particulado biodegradable (XND): 4 g N/m³
- Alcalinidad (SALK): 100 g COD/m³

Los valores de nuestra agua residual son:

- Materia orgánica soluble inerte (SI): 21 g COD/m³
- Sustrato rápidamente biodegradable (SS): 241.5 g COD/m³
- Materia orgánica particulada inerte (XI): 15.7 g COD/m³
- Sustrato lentamente biodegradable (Xs): 225.7 g COD/m³
- Biomasa activa heterótrofa (XBH): 0 g COD/m³
- Biomasa activa autótrofa (XBA): 0 g COD/m³
- Partícula producto del decaimiento de biomasa (Xp): 0 g N/m³
- Nitrógeno como nitrato o nitrito (SNO): 0.85 g NO₃-N/m³
- Nitrógeno como amoníaco o amonio (SNH): 45.9 NH₃-N/m³
- Nitrógeno orgánico soluble biodegradable (SND): 7.2 g N/m³
- Nitrógeno orgánico particulado biodegradable (XND): 6.77 g N/m³
- Alcalinidad (SALK): 100 g COD/m³

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para este estudio, se procedió a elaborar el algoritmo de cálculo para su implementación en MATLAB. Este código MATLAB se desarrolló para modelar un sistema de tratamiento de aguas residuales mediante el método de diferencias finitas. La modelización se basa en el Modelo ASM1 (Activated Sludge Model No. 1) de la Asociación Internacional del Agua (IWA), que permite simular el comportamiento de reactores biológicos

utilizados en procesos de tratamiento de aguas residuales. El ASM1 considera varios procesos biológicos y cinéticos, incluyendo el crecimiento de biomasa heterótrofa y autótrofa, la degradación de materia orgánica, la nitrificación y denitrificación, entre otros.

En este código, se realiza un balance de materia para 13 componentes diferentes, y las ecuaciones diferenciales que rigen su comportamiento se resuelven mediante el método de diferencias finitas. Estas ecuaciones representan la dinámica de concentración de componentes clave, como materia orgánica, biomasa, nitrógeno, entre otros, a lo largo del tiempo.

Este código proporciona resultados finales y representa gráficamente la evolución de las concentraciones de las distintas variables a lo largo del tiempo, lo que resulta fundamental para el diseño y la optimización de sistemas de tratamiento de aguas residuales. La modelización de sistemas de tratamiento de aguas residuales es un enfoque crítico para garantizar la eficiencia en la eliminación de contaminantes y la protección del medio ambiente.

3.1. Código MATLAB para el CASO 1

```
dt=0.5e-3;dias=50;time=(0:dt:dias);
QX=zeros(1,length(time));
FMA=QX;FMR=QX;SND=QX;SNH=QX;SNO=QX;SS=QX;XBA=QX;XBH=QX;XI=QX;XND=QX;XP=QX;XS=QX;
SI=QX;SALK=QX;TSS=QX;
% Parámetros cinéticos
uH=6.0;uA=0.8;KS=20;KOH=0.2;KNH=1.0;KNO=0.5;ka=0.08;kh=3;KX=0.03;KOA=0.4;bH=0.62;
bA=0.15;ng=0.8;nh=0.4;
% Parámetros estequiométricos
YH=0.67;fp=0.08;YA=0.24;ixB=0.086;ixP=0.06;
% Componentes del modelo
Q0=250;QX=250;VH=91;SO=0;SS0=241.5;XS0=225.7;XTE=0;XBH0=21;XBA0=0;XP0=0;SNO0=0.85;
SNH0=45.9;SND0=7.2;XND0=6.77;SALK0=100;SI0=21;XI0=15.7;
% Valores iniciales
SS(1)=10;XS(1)=50;XBH(1)=1300;XBA(1)=70;XP(1)=1400;SNO(1)=5;SNH(1)=5;SND(1)=0.5;
XND(1)=4;SALK(1)=100;SI(1)=20;XI(1)=350;
TSS(1)=(XBA(1)+XBH(1)+XS(1)+XP(1))/1.2+XI(1);TS=TSS(1)*VH;

for i=2:dias/dt+1
    r1=uH*SS(i-1)/(KS+SS(i-1))*SO/(KOH+SO)*XBH(i-1);
    r2=uH*SS(i-1)/(KS+SS(i-1))*KOH/(KOH+SO)*SNO(i-1)/(KNO+SNO(i-1))*ng*XBH(i-1);
    r3=uA*SNH(i-1)/(KNH+SNH(i-1))*SO/(KOA+SO)*XBA(i-1);
    r4=bH*XBH(i-1);
    r5=bA*XBA(i-1);
    r6=ka*SND(i-1)*XBH(i-1);
    r7=kh*XS(i-1)/XBH(i-1)/(KX+XS(i-1)/XBH(i-1))*...
        (SO/(KOH+SO)+nh*KOH/(KOH+SO)*SNO(i-1)/(KNO+SNO(i-1)))*XBH(i-1);
    r8=r7*XND(i-1)/XS(i-1);
    rSI=0;
    rSS=-1/YH*(r1+r2)+r7;
    rXI=0;
    rXS=(1-fp)*(r4+r5)-r7;
    rXBH=r1+r2-r4;
    rXBA=r3-r5;
    rXP=fp*(r4+r5);
    rSNO=-(1-YH)/2.86/YH*r2+r3/YA;
    rSNH=-ixB*(r1+r2)-(ixB+1/YA)*r3+r6;
    rSND=-r6+r8;
    rXND=(ixB-fp*ixP)*(r4+r5)-r8;
    rSALK=-(ixB/14)*r1+((1-YH)/(14*2.86*YH)-ixB/14)*r2-...
        (ixB/14+1/(7*YA))*r3+(1/14)*r6;
    SI(i)=SI(i-1)+((1/VH)*(Q0*SI0+QX*SI(i-1)-(Q0+QX)*SI(i-1))+rSI)*dt;
    SS(i)=SS(i-1)+((1/VH)*(Q0*SS0+QX*SS(i-1)-(Q0+QX)*SS(i-1))+rSS)*dt;
    XI(i)=XI(i-1)+((1/VH)*(Q0*XI0+QX*XI(i-1)-(Q0+QX)*XI(i-1))+rXI)*dt;
    XS(i)=XS(i-1)+((1/VH)*(Q0*XS0+QX*XS(i-1)-(Q0+QX)*XS(i-1))+rXS)*dt;
    XBH(i)=XBH(i-1)+((1/VH)*(Q0*XBH0+QX*XBH(i-1)-(Q0+QX)*XBH(i-1))+rXBH)*dt;
    XBA(i)=XBA(i-1)+((1/VH)*(Q0*XBA0+QX*XBA(i-1)-(Q0+QX)*XBA(i-1))+rXBA)*dt;
    XP(i)=XP(i-1)+((1/VH)*(Q0*XP0+QX*XP(i-1)-(Q0+QX)*XP(i-1))+rXP)*dt;
    SNO(i)=SNO(i-1)+((1/VH)*(Q0*SNO0+QX*SNO(i-1)-(Q0+QX)*SNO(i-1))+rSNO)*dt;
    SNH(i)=SNH(i-1)+((1/VH)*(Q0*SNH0+QX*SNH(i-1)-(Q0+QX)*SNH(i-1))+rSNH)*dt;
    SND(i)=SND(i-1)+((1/VH)*(Q0*SND0+QX*SND(i-1)-(Q0+QX)*SND(i-1))+rSND)*dt;
    XND(i)=XND(i-1)+((1/VH)*(Q0*XND0+QX*XND(i-1)-(Q0+QX)*XND(i-1))+rXND)*dt;
    SALK(i)=SALK(i-1)+((1/VH)*(Q0*SALK0+QX*SALK(i-1)-(Q0+QX)*SALK(i-1))+rSALK)*dt;
end

FMA=Q0*(SS0+XS0)/(VH*(XBA+XBH)/1.2);
```

```

FMR=Q0*(SS0+XS0)/(VH*(XBA+XBH)/1.2);
MM=Q0*(SNH0+SNO0+SND0+XND0)/(VH*(XBA+XBH)/1.2);
r=XTE/(XBA(i)+XBH(i)+XS(i)+XI(i)*1.2+XP(i))*1.2;
XIE(i)=r*XI(i);count=1;
table(count,:)= [time(1) FMA(1) FMR(1) SND(1) SNH(1) SNO(1) SS(1) XBA(1) XBH(1) XI(1)
XND(1) XP(1) XS(1)];
for k=1:(i-1)
    if rem(k*dt,0.5)==0
        count=count+1;
        table(count,:)= [time(k) FMA(k) FMR(k) SND(k) SNH(k) SNO(k) SS(k) XBA(k) XBH(k)
XI(k) XND(k) XP(k) XS(k)];
    end
end
% Mostrar los resultados finales
disp('Resultados finales:');
disp(final_results);
% Gráficas
figure;
subplot(2, 1, 1);
plot(time, XS, 'b', time, XBH, 'g', time, XBA, 'r', time, XP, 'c');
title('Concentración de XS, XBH, XBA y XP');
xlabel('Tiempo (días)');
ylabel('Concentración (mg/L)');
legend('XS', 'XBH', 'XBA', 'XP');
grid on;
subplot(2, 1, 2);
plot(time, SNO, 'b', time, SNH, 'g', time, SND, 'r', time, XND, 'c');
title('Concentración de Nitrógeno');
xlabel('Tiempo (días)');
ylabel('Concentración (mg/L)');
legend('SNO', 'SNH', 'SND', 'XND');
grid on;
figure;
subplot(2, 1, 1);
plot(time, SALK, 'b');
title('Concentración de Alcalinidad');
xlabel('Tiempo (días)');
ylabel('Concentración (mg/L)');
grid on;
subplot(2, 1, 2);
plot(time, SI, 'b', time, XI, 'g');
title('Concentración de Materia Orgánica');
xlabel('Tiempo (días)');
ylabel('Concentración (mg/L)');
legend('SI', 'XI');
grid on;

```

3.2. Código MATLAB para el CASO 2

```

dt=0.5e-3;dias=50;time=(0:dt:dias);
QX=zeros(1,length(time));
FMA=QX;FMR=QX;SND=QX;SNH=QX;SNO=QX;SS=QX;XBA=QX;XBH=QX;XI=QX;XND=QX;XP=QX;XS=QX;
SI=QX;SALK=QX;TSS=QX;SND2=QX;SNH2=QX;SNO2=QX;SS2=QX;XBA2=QX;XBH2=QX;XI2=QX;XND2=QX;
XP2=QX;XS2=QX;SI2=QX; SALK2=QX;
% Parámetros cinéticos
uH=6.0;uA=0.8;KS=20;KOH=0.2;KNH=1.0;KNO=0.5;ka=0.08;kh=3;KX=0.03;KOA=0.4;bH=0.62;
bA=0.15;ng=0.8;nh=0.4;
% Parámetros estequiométricos
YH=0.67;fp=0.08;YA=0.24;ixB=0.086;ixP=0.06;
% Componentes del modelo
Q0=250;QX=250;VH=91;VH2=128;SO=0;SO2=2;SS0=241.5;XS0=225.7;XTE=0;XBH0=21;XBA0=0;
XP0=0;SNO0=0.85;SNH0=45.9;SND0=7.2;XND0=6.77;SALK0=100;SI0=21;XI0=15.7;
% Valores iniciales (Zona 1)
SS(1)=10;XS(1)=50;XBH(1)=1300;XBA(1)=70;XP(1)=1400;SNO(1)=5;SNH(1)=5;SND(1)=0.5;
XND(1)=4;SALK(1)=100;SI(1)=20;XI(1)=350;
% Valores iniciales (Zona 2)
SS2(1)=10;XS2(1)=50;XBH2(1)=1300;XBA2(1)=70;XP2(1)=1400;SNO2(1)=5;SNH2(1)=5;
SND2(1)=0.5;XND2(1)=4;SALK2(1)=100;SI2(1)=20;XI2(1)=350;
TSS(1)=(XBA(1)+XBH(1)+XS(1)+XP(1))/1.2+XI(1);TS=TSS(1)*VH;
for i=2:dias/dt+1
    r1=uH*SS(i-1)/(KS+SS(i-1))*SO/(KOH+SO)*XBH(i-1);
    r2=uH*SS(i-1)/(KS+SS(i-1))*KOH/(KOH+SO)*SNO(i-1)/(KNO+SNO(i-1))*ng*XBH(i-1);
    r3=uA*SNH(i-1)/(KNH+SNH(i-1))*SO/(KOA+SO)*XBA(i-1);
    r4=bH*XBH(i-1);

```

```

r5=bA*XBA(i-1);
r6=ka*SND(i-1)*XBH(i-1);
r7=kh*XS(i-1)/XBH(i-1)/(KX+XS(i-1)/XBH(i-1))*(SO/(KOH+SO)+...
    nh*KOH/(KOH+SO)*SNO(i-1)/(KNO+SNO(i-1)))*XBH(i-1);
r8=r7*XND(i-1)/XS(i-1);
rSI=0;
rSS=-1/YH*(r1+r2)+r7;
rXI=0;
rXS=(1-fp)*(r4+r5)-r7;
rXBH=r1+r2-r4;
rXBA=r3-r5;
rXP=fp*(r4+r5);
rSNO=-(1-YH)/2.86/YH*r2+r3/YA;
rSNH=-iXB*(r1+r2)-(iXB+1/YA)*r3+r6;
rSND=-r6+r8;
rXND=(iXB-fp*iXP)*(r4+r5)-r8;
rSALK=-(iXB/14)*r1+((1-YH)/(14*2.86*YH)-iXB/14)*r2-...
    (iXB/14+1/(7*YA))*r3+(1/14)*r6;
SI(i)=SI(i-1)+((1/VH)*(Q0*SI0+QX*SI2(i-1)-(Q0+QX)*SI(i-1))+rSI)*dt;
SS(i)=SS(i-1)+((1/VH)*(Q0*SS0+QX*SS2(i-1)-(Q0+QX)*SS(i-1))+rSS)*dt;
XI(i)=XI(i-1)+((1/VH)*(Q0*XI0+QX*XI2(i-1)-(Q0+QX)*XI(i-1))+rXI)*dt;
XS(i)=XS(i-1)+((1/VH)*(Q0*XS0+QX*XS2(i-1)-(Q0+QX)*XS(i-1))+rXS)*dt;
XBH(i)=XBH(i-1)+((1/VH)*(Q0*XBH0+QX*XBH2(i-1)-(Q0+QX)*XBH(i-1))+rXBH)*dt;
XBA(i)=XBA(i-1)+((1/VH)*(Q0*XBA0+QX*XBA2(i-1)-(Q0+QX)*XBA(i-1))+rXBA)*dt;
XP(i)=XP(i-1)+((1/VH)*(Q0*XP0+QX*XP2(i-1)-(Q0+QX)*XP(i-1))+rXP)*dt;
SNO(i)=SNO(i-1)+((1/VH)*(Q0*SNO0+QX*SNO2(i-1)-(Q0+QX)*SNO(i-1))+rSNO)*dt;
SNH(i)=SNH(i-1)+((1/VH)*(Q0*SNH0+QX*SNH2(i-1)-(Q0+QX)*SNH(i-1))+rSNH)*dt;
SND(i)=SND(i-1)+((1/VH)*(Q0*SND0+QX*SND2(i-1)-(Q0+QX)*SND(i-1))+rSND)*dt;
XND(i)=XND(i-1)+((1/VH)*(Q0*XND0+QX*XND2(i-1)-(Q0+QX)*XND(i-1))+rXND)*dt;
SALK(i)=SALK(i-1)+((1/VH)*(Q0*SALK0+QX*SALK2(i-1)-(Q0+QX)*SALK(i-1))+rSALK)*dt;

r12=uH*SS2(i-1)/(KS+SS2(i-1))*SO2/(KOH+SO2)*XBH2(i-1);
r22=uH*SS2(i-1)/(KS+SS2(i-1))*KOH/(KOH+SO2)*SNO2(i-1)/...
    (KNO+SNO2(i-1))*ng*XBH2(i-1);
r32=uA*SNH2(i-1)/(KNH+SNH2(i-1))*SO2/(KOA+SO2)*XBA2(i-1);
r42=bH*XBH2(i-1);
r52=bA*XBA2(i-1);
r62=ka*SND2(i-1)*XBH2(i-1);
r72=kh*XS2(i-1)/XBH2(i-1)/(KX+XS2(i-1)/XBH2(i-1))*(SO2/(KOH+SO2)+...
    nh*KOH/(KOH+SO2)*SNO2(i-1)/(KNO+SNO2(i-1)))*XBH2(i-1);
r82=r72*XND2(i-1)/XS2(i-1);
rSI2=0;
rSS2=-1/YH*(r12+r22)+r72;
rXI2=0;
rXS2=(1-fp)*(r42+r52)-r72;
rXBH2=r12+r22-r42;
rXBA2=r32-r52;
rXP2=fp*(r42+r52);
rSNO2=-(1-YH)/2.86/YH*r22+r32/YA;
rSNH2=-iXB*(r12+r22)-(iXB+1/YA)*r32+r62;
rSND2=-r62+r82;
rXND2=(iXB-fp*iXP)*(r42+r52)-r82;
rSALK2=-(iXB/14)*r12+((1-YH)/(14*2.86*YH)-iXB/14)*r22-...
    (iXB/14+1/(7*YA))*r32+(1/14)*r62;
SI2(i)=SI2(i-1)+((1/VH2)*((Q0+QX)*SI(i-1)-(Q0+QX)*SI2(i-1))+rSI2)*dt;
SS2(i)=SS2(i-1)+((1/VH2)*((Q0+QX)*SS(i-1)-(Q0+QX)*SS2(i-1))+rSS2)*dt;
XI2(i)=XI2(i-1)+((1/VH2)*((Q0+QX)*XI(i-1)-(Q0+QX)*XI2(i-1))+rXI2)*dt;
XS2(i)=XS2(i-1)+((1/VH2)*((Q0+QX)*XS(i-1)-(Q0+QX)*XS2(i-1))+rXS2)*dt;
XBH2(i)=XBH2(i-1)+((1/VH2)*((Q0+QX)*XBH(i-1)-(Q0+QX)*XBH2(i-1))+rXBH2)*dt;
XBA2(i)=XBA2(i-1)+((1/VH2)*((Q0+QX)*XBA(i-1)-(Q0+QX)*XBA2(i-1))+rXBA2)*dt;
XP2(i)=XP2(i-1)+((1/VH2)*((Q0+QX)*XP(i-1)-(Q0+QX)*XP2(i-1))+rXP2)*dt;
SNO2(i)=SNO2(i-1)+((1/VH2)*((Q0+QX)*SNO(i-1)-(Q0+QX)*SNO2(i-1))+rSNO2)*dt;
SNH2(i)=SNH2(i-1)+((1/VH2)*((Q0+QX)*SNH(i-1)-(Q0+QX)*SNH2(i-1))+rSNH2)*dt;
SND2(i)=SND2(i-1)+((1/VH2)*((Q0+QX)*SND(i-1)-(Q0+QX)*SND2(i-1))+rSND2)*dt;
XND2(i)=XND2(i-1)+((1/VH2)*((Q0+QX)*XND(i-1)-(Q0+QX)*XND2(i-1))+rXND2)*dt;
SALK2(i)=SALK2(i-1)+((1/VH2)*((Q0+QX)*SALK(i-1)-(Q0+QX)*SALK2(i-1))+rSALK2)*dt;
end
FMA=Q0*(SS0+XS0)/(VH*(XBA+XBH)/1.2);
FMR=Q0*(SS0+XS0)/(VH*(XBA+XBH)/1.2);
MM=Q0*(SNH0+SNO0+SND0+XND0)/(VH*(XBA+XBH)/1.2);
r=XTE/(XBA(i)+XBH(i)+XS(i)+XI(i)*1.2+XP(i))*1.2;
XIE(i)=r*XI(i);count=1;
table(count,:)= [time(1) FMA(1) FMR(1) SND(1) SNH(1) SNO(1) SS(1) XBA(1) XBH(1) XI(1)
XND(1) XP(1) XS(1)];
for k=1:(i-1)

```

```

if rem(k*dt,0.5)==0
    count=count+1;
    table(count,:)=[time(k) FMA(k) FMR(k) SND(k) SNH(k) SNO(k) SS(k) XBA(k) XBH(k)
        XI(k) XND(k) XP(k) XS(k)];
end
end
% Resultados finales para Zona 1
final_results_zone1 = [SS(end), XS(end), XBH(end), XBA(end), XP(end), SO(end), SNO(end),
    SNH(end), SND(end), XND(end), SALK(end), SI(end), XI(end)];
% Resultados finales para Zona 2
final_results_zone2 = [SS2(end), XS2(end), XBH2(end), XBA2(end), XP2(end), SO2(end),
    SNO2(end), SNH2(end), XND2(end), SALK2(end), SI2(end), XI2(end)];
% Mostrar los resultados finales para Zona 1
disp('Resultados finales - Zona 1:');
disp(final_results_zone1);
% Mostrar los resultados finales para Zona 2
disp('Resultados finales - Zona 2:');
disp(final_results_zone2);
% Gráficas
figure;
subplot(2, 1, 1);
plot(time, XBH, 'b', time, XBH2, 'g');
title('Concentración de Biomasa XBH en Zona 1 y Zona 2');
xlabel('Tiempo (días)');
ylabel('Concentración (mg/L)');
legend('Zona 1', 'Zona 2');
grid on;
subplot(2, 1, 2);
plot(time, XBA, 'b', time, XBA2, 'g');
title('Concentración de Biomasa XBA en Zona 1 y Zona 2');
xlabel('Tiempo (días)');
ylabel('Concentración (mg/L)');
legend('Zona 1', 'Zona 2');
grid on;

```

4. RESULTADOS

CASO 1

Luego de realizar nuestra simulación por un tiempo de 50 días, se obtuvo un efluente con las siguientes características:

- Materia orgánica soluble inerte (S_I): 21 g COD/m³
- Sustrato rápidamente biodegradable (S_S): 236.017 g COD/m³
- Materia orgánica particulada inerte (X_I): 15.7 g COD/m³
- Sustrato lentamente biodegradable (X_S): 228.8039 g COD/m³
- Biomasa activa heterótrofa (X_{BH}): 20.7938 g COD/m³
- Biomasa activa autótrofa (X_{BA}): 0 g COD/m³
- Partícula producto del decaimiento de biomasa (X_P): 0.3754 g N/m³
- Nitrógeno como nitrato o nitrito (S_{NO}): 0.0773 g NO₃-N/m³
- Nitrógeno como amoníaco o amonio (S_{NH}): 48.2438 NH₃-N/m³
- Nitrógeno orgánico soluble biodegradable (S_{ND}): 4.5080 g N/m³
- Nitrógeno orgánico particulado biodegradable (X_{ND}): 7.1133 g N/m³
- Alcalinidad (S_{ALK}): 100.2226 g COD/m³

CASO 2

Luego de realizar nuestra simulación por un tiempo de 50 días, se obtuvo un efluente con las siguientes características:

- Materia orgánica soluble inerte (S_I): 21 g COD/m³
- Sustrato rápidamente biodegradable (S_S): 18.1370 g COD/m³
- Materia orgánica particulada inerte (X_I): 15.7 g COD/m³
- Sustrato lentamente biodegradable (X_S): 33.6926 g COD/m³

- Biomasa activa heterótrofa (X_{BH}): 257.0029 g COD/m³
- Biomasa activa autótrofa (X_{BA}): 0 g COD/m³
- Partícula producto del decaimiento de biomasa (X_p): 8.8207 g N/m³
- Nitrógeno como nitrato o nitrito (S_{NO}): 0.0023 g NO₃-N/m³
- Nitrógeno como amoníaco o amonio (S_{NH}): 36.0607 NH₃-N/m³
- Nitrógeno orgánico soluble biodegradable (S_{ND}): 1.3630 g N/m³
- Nitrógeno orgánico particulado biodegradable (X_{ND}): 1.6208 g N/m³
- Alcalinidad (S_{ALK}): 99.3577 g COD/m³

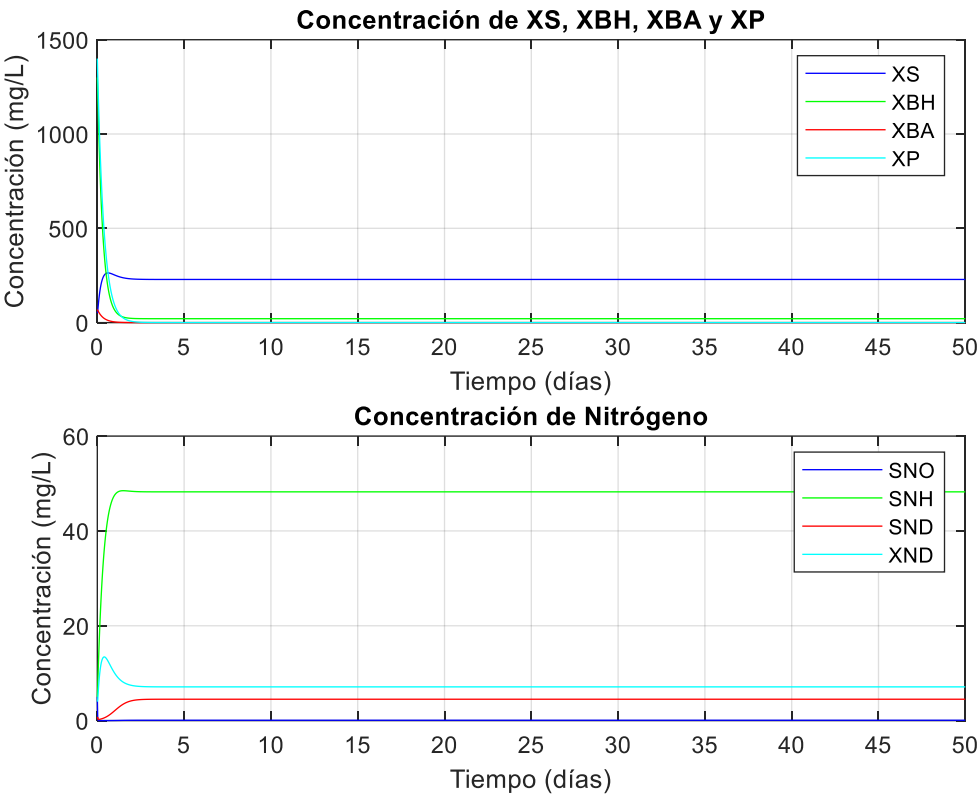


Figura 1. Concentración componentes. CASO 1

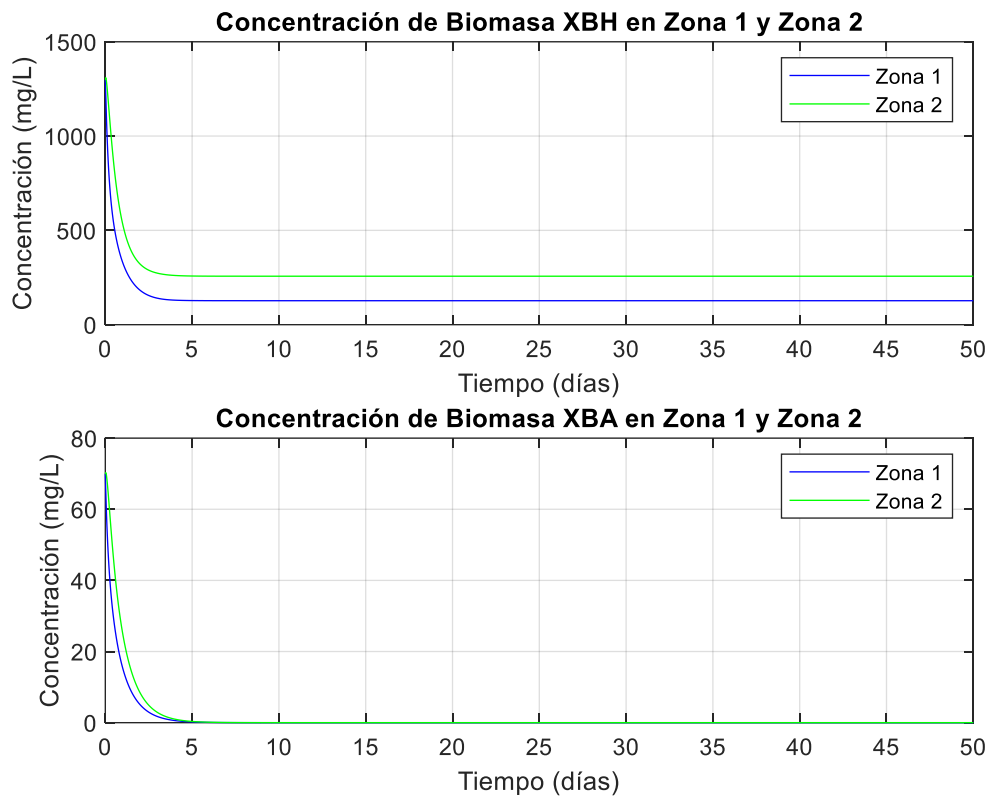


Figura 2. Concentración de X_{BH} y X_{BA} en Zona 1 y 2. . CASO 2

5. CONCLUSIONES

El desarrollo e implementación del modelo IWA ASM1 en MATLAB ofrece una herramienta valiosa para el análisis y diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales. El modelo proporciona una comprensión detallada del comportamiento de los reactores biológicos y permite evaluar diferentes estrategias de operación para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del tratamiento.

La capacidad de adaptar el modelo para sistemas de uno y dos reactores amplía su aplicabilidad y utilidad en una amplia gama de sistemas de tratamiento. La combinación de la robustez del modelo IWA ASM1 y la flexibilidad de MATLAB hace posible realizar simulaciones precisas y confiables para el diseño y optimización de sistemas de tratamiento de aguas residuales, contribuyendo así al desarrollo de tecnologías más eficientes y respetuosas con el medio ambiente.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Belandria, M., Gómez, C., Márquez, R., & Ríos, M. (2012). Modelo promedio de un proceso de lodos activados en alternancia de fases para la remoción de nitrógeno en aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería*, 33(2), 105-112.
- Espinosa-Rodríguez, M. A., & Fall, C. (2015). Optimization de la producción de lodos en un sistema de lodos activados a través de la calibración del modelo ASM1. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 16(1), 93-104.

- Fall, C., Romero, R. C., & Delgado, C. D. (2006). Modelación matemática de plantas de tratamiento de lodos activados. *Retema: Revista técnica de medio ambiente*, 19(110), 32-47.
- Henze, M., Grady Jr., C. P. L., Gujer, W., Marais, G. R., Matsuo, T., Activated Sludge Model n° . Scientific and Thecnical Report No. 1, 1987, IAWPRC, London.
- Yang, W. Y., Cao, W., Kim, J., Park, K. W., Park, H. H., Joung, J., ... & Im, T. (2020). *Applied numerical methods using MATLAB*. John Wiley & Sons.
- Young, T., & Mohlenkamp, M. J. (2021). *Introduction to numerical methods and Matlab Programming for Engineers*.