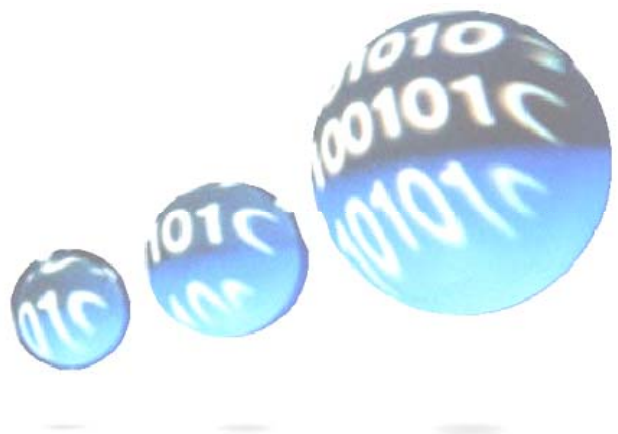


CAPITULO VI



VI. MODELO ASM No. 1 “ACTIVATED SLUDGE MODEL No.1”

Como ya se mencionó con anterioridad, éste se origina cuando la IAWPRC designa un grupo de personas para unificar y promover la creación de un modelo matemático determinístico mecánico simple, el trabajo de este grupo de trabajo culminó con la presentación del “Activated Sludge Model No.1 en su reporte técnico y científico en 1987.

Este modelo se ha convertido en base para estudio de procesos biológicos de agua residual, por lo que es importante describir como se compone el mismo y cuales son sus principales características.

6.1 Características del ASM No. 1

El modelo matemático esta compuesto de 8 procesos de transformación, en los cuales interactúan 13 compuestos que caracterizan el agua residual.

6.2 Componentes del ASM No. 1

El modelo contempla dos clases de componente en cuanto a sus características físicas, material en partícula (X) y material soluble (S). Un material se considera soluble si es capaz de pasar por un filtro de membrana de 0.45 μm de porosidad. Los componentes con su simbología respectiva se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4. Componentes del ASM No. 1

<i>Componente</i> #	<i>Símbolo</i>	<i>Unidades</i>	<i>Definición</i>
1	S_I	$M(\text{COD})L^{-3}$	Materia orgánica inerte soluble
2	S_S	$M(\text{COD})L^{-3}$	Sustrato rápidamente biodegradable
3	X_I	$M(\text{COD})L^{-3}$	Materia orgánica en partículas inerte
4	X_S	$M(\text{COD})L^{-3}$	Sustrato lentamente biodegradable en partícula
5	$X_{B,H}$	$M(\text{COD})L^{-3}$	Biomasa heterotrófica activa
6	$X_{B,A}$	$M(\text{COD})L^{-3}$	Biomasa autotrófica activa
7	X_P	$M(\text{COD})L^{-3}$	Productos provenientes del decaimiento de biomasa
8	S_O	$M(-\text{COD})L^{-3}$	Oxígeno disuelto
9	S_{ON}	$M(N)L^{-3}$	Nitratos y nitritos solubles
10	S_{NH}	$M(N)L^{-3}$	Amoniaco soluble

11	S_{ND}	$M(N)L^{-3}$	Nitrógeno orgánico soluble rápidamente biodegradable
12	X_{ND}	$M(N)L^{-3}$	Nitrógeno orgánico en partícula biodegradable
13	S_{ALK}	Unidades molares	Alcalinidad

Todos los compuestos orgánicos tienen unidades de demanda química de oxígeno, simplificando los coeficientes estequiométricos y reduce el número de factores de conversión.

6.3 Descripción de los componentes

Materia orgánica inerte soluble, S_I . Este componente es imposible su degradación mediante métodos biológicos, la cantidad de entrada de este componente es la misma que sale del sistema sin presentar cambio alguno.

Sustrato rápidamente biodegradable, S_S . Es la materia orgánica rápidamente biodegradable, se compone de moléculas simples. Esta fracción se considera el único sustrato relacionado con crecimiento de biomasa heterótrofa, el uso de aceptadores de electrones responde inmediatamente al cambio de su concentración.

Materia orgánica en partícula inerte, X_I . A diferencia con la soluble, ésta queda atrapada en los SSVLM y sale del sistema junto con los lodos en exceso.

Sustrato lentamente biodegradable en partícula, X_S . Es la fracción de materia orgánica lentamente biodegradable, son moléculas complejas de alto peso molecular, cuando entran en el sistema quedan rápidamente atrapadas en flóculos, sufren un proceso de hidrólisis para ser convertidas en sustrato rápidamente biodegradable (S_S), con el fin de poder ser utilizadas como alimento para la biomasa heterótrofa.

Biomasa heterotrófica activa, $X_{B,H}$; son los microorganismos responsables de la degradación de materia orgánica bajo condiciones aerobias y anóxicas (ausencia de oxígeno, presencia de nitritos o nitratos). Su concentración disminuye a medida que va descendiendo la concentración de oxígeno.

Biomasa autotrófica activa, $X_{B,A}$. Es el componente responsable de la oxidación de amoníaco a nitritos en presencia de oxígeno.

Productos provenientes del decaimiento de biomasa, X_P . Representa las células muertas que provienen de la lisis de ambas biomásas, heterotrófica y autotrófica.

Oxígeno disuelto, S_O . Se incluye como componente debido a su importancia para el crecimiento de la biomasa heterotrófica y autotrófica.

Nitratos y nitritos solubles, S_{NO} . Combina en una sola especie, los nitratos y nitritos presentes en el agua residual, sin embargo en la estequiometría se considera sólo la presencia de nitratos. Es el producto de las bacterias autotróficas y sirven también como receptores de electrones para las bacterias denitrificadoras heterotróficas bajo condiciones anóxicas.

Nitrógeno amoniacal, S_{NH} . Representa la combinación de nitrógeno amoniacal ionizado y no ionizado en un solo componente, siendo éste el sustrato de para la biomasa autotrófica, así como fuente de nitrógeno para la síntesis de biomasa.

Nitrógeno orgánico soluble rápidamente biodegradable, S_{ND} . Este componente afecta aumentando la cantidad de nitrógeno amoniacal, el cual participa en la nitrificación ó en la asimilación de biomasa.

Nitrógeno orgánico biodegradable en partícula, X_{ND} . Con las mismas características que el nitrógeno orgánico soluble rápidamente biodegradable.

Alcalinidad, S_{ALK} . Aunque no es esencial su presencia, provee información acerca de la estabilidad del pH, además ayuda a resistir sus cambios debido a la adición de ácido, ya que si el pH descendiera inhibiría la actividad biológica.

6.4 Procesos del modelo ASM No. 1

Son los procesos de transformación del agua residual como materia prima en distintos productos que también caracterizan el agua residual.

Tabla 5. Procesos de transformación en el ASM No. 1

Procesos de transformación en el modelo ASIM No.1

1	Crecimiento aerobio de biomasa heterotrófica
2	Crecimiento anóxico de biomasa heterotrófica
3	Crecimiento aerobio de biomasa autotrófica
4	Decaimiento de biomasa heterotrófica
5	Decaimiento de biomasa autotrófica
6	Amonificación de nitrógeno orgánico soluble
7	Hidrólisis de materia orgánica atrapada
8	Hidrólisis de nitrógeno orgánico soluble atrapado

6.5 Descripción de los procesos

Crecimiento aerobio de biomasa heterotrófica. Se considera el proceso más importante para de remoción de materia orgánica. Una fracción de sustrato rápidamente biodegradable se utilizada para el crecimiento de la biomasa y el resto es oxidado como fuente de energía aumentando la demanda de oxígeno asociada. El crecimiento es modelado usando la cinética de Monod. El amoniaco es utilizado como fuente para la síntesis y es incorporado a la masa celular. La concentración de S_s y S_o son los componentes limitantes para este proceso.

Crecimiento anóxico de biomasa heterotrófica. Este proceso también es conocido como denitrificación. En ausencia de oxígeno los organismos heterotróficos son capaces de usar nitrato como receptor de electrones siendo S_s el sustrato. Este proceso lleva a una producción de biomasa heterotrófica y de nitrógeno gas. También la cinética de Monod se utiliza para describir este proceso.

Crecimiento aerobio de biomasa autotrófica. También conocido como proceso de nitrificación. El amoniaco es oxidado a nitrato, produciéndose biomasa autotrófica y aumentando la demanda de oxígeno. El amoniaco también se utiliza como fuente de nitrógeno para la síntesis e incorporación de masa celular. También se modela con la cinética de Monod.

Decaimiento de biomasa heterotrófica. Los organismos mueren a cierta velocidad y una proporción del material muerto se considera no-biodegradable y se une a la

fracción de X_p . El resto de biomasa muerta se combina con el sustrato lentamente biodegradable. El nitrógeno orgánico asociado con el X_S se convierte en nitrógeno orgánico en partícula. No existe pérdida de DQO, ni receptores de electrones son utilizados. El proceso presenta la misma velocidad tanto en condiciones aerobias, anóxicas y anaerobias.

Decaimiento de biomasa autotrófica. Este proceso se describe de la misma manera que el decaimiento de la biomasa heterotrófica.

Amonificación de nitrógeno orgánico soluble. El nitrógeno orgánico soluble es transformado en amoníaco mediante microorganismos heterótrofos, es un proceso descrito con cinética de primer orden.

Hidrólisis de compuestos orgánicos atrapados. El sustrato lentamente biodegradable mezclado con el lodo se descompone extra-celularmente, produciéndose sustrato rápidamente biodegradable disponible para el crecimiento microorganismos. El proceso se modela basado en una cinética de reacción de superficie y ocurre bajo condiciones aerobias y anóxicas. La velocidad de hidrólisis es menor en ambientes anóxicos en comparación en aerobios. La velocidad de reacción es de primer orden con respecto a la biomasa heterotrófica presente.

Hidrólisis de nitrógeno orgánico atrapado. EL nitrógeno orgánico rápidamente biodegradable es convertido a nitrógeno orgánico soluble a una tasa semejante a la descrita para los compuestos orgánicos.

Una vez descritos los componentes y los procesos, se presenta la matriz que describe de una manera sencilla el proceso de tratamiento de agua residual. La matriz queda de la siguiente manera:

Figura 3. Matriz estequiométrica para el modelo ASM No. 1

COMPONENTE	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
j PROCESO	S_I	S_S	X_I	X_S	$X_{B,H}$	$X_{B,A}$	X_P	S_O	S_{NO}	S_{NH}	S_{ND}	X_{ND}	S_{ALK}	
1 Crecimiento aerobio de biomasa heterotrófica		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$\frac{1-Y_H}{Y_H}$		$-i_{XB}$			$-\frac{i_{XB}}{14}$	
2 Crecimiento anóxico de biomasa heterotrófica		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-Y_H}{2.86Y_H}$		$-i_{XB}$			$\frac{1-Y_H}{14 \cdot 2.86Y_H} - \frac{i_{XB}}{14}$	
3 Crecimiento aerobio de biomasa autotrófica						1		$-\frac{4.57}{Y_A} + 1$	$\frac{1}{Y_A}$	$-i_{XB} - \frac{1}{Y_A}$			$-\frac{i_{XB}}{14} - \frac{1}{7Y_A}$	
4 Decaimiento de biomasa heterotrófica				$1-f_P$	-1		f_P					$i_{XB} - f_P i_{XP}$		
5 Decaimiento de biomasa autotrófica				$1-f_P$		-1	f_P					$i_{XB} - f_P i_{XP}$		
6 Amonificación de nitrógeno orgánico soluble										1	-1		$\frac{1}{14}$	
7 Hidrólisis de materia orgánica atrapada		1		-1										
8 Hidrólisis de nitrógeno orgánico soluble atrapado											1	-1		
Ecuación de conversión [ML ⁻³ T ⁻¹]	$r_i = \sum_j v_{ij} \rho_j$													

6.6 Parámetros estequiométricos

En la matriz se observan valores que relacionan de forma estequiométrica los componentes en los diferentes procesos de transformación. Los parámetros estequiométricos del modelo ASM No.1 son:

Tabla 6. Parámetros estequiométricos empleados en el ASM No. 1

Definición	Símbolo	Unidades
Producción de biomasa heterotrófica	Y_H	g DQO biomasa / g DQO utilizada
Producción de biomasa autotrófica	Y_A	g DQO biomasa / g N oxidado
Fracción de masa productora de productos en partículas	f_P	g descomposición células / g DQO biomasa
Masa N/masa DQO en la biomasa	i_{XB}	g N / g DQO biomasa activa
Masa N/masa DQO en productos de la biomasa	i_{XP}	g N / g DQO biomasa muerta

6.7 Parámetros cinéticos

En las ecuaciones de cada proceso se observan otros valores de gran importancia, éstos son los parámetros cinéticos de cada proceso. Es de suma importancia realizar una correcta selección de estos valores así como de los estequiométricos, con el fin de poder tener un modelo que represente el proceso deseado. Los parámetros cinéticos se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 7. Parámetros cinéticos empleados en el ASM No. 1		
<i>Definición</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidades</i>
Tasa máxima específica de crecimiento para bacterias heterótrofas	μ_H	d^{-1}
Coefficiente de saturación media para bacterias heterótrofas	K_s	$d \text{ DQO } m^{-3}$
Coefficiente de saturación media de demanda oxígeno para bacterias heterótrofas	$K_{O,H}$	$g \text{ O}_2 / m^3$
Coefficiente de saturación media de nitrato	K_{NO}	$g \text{ NO}_3\text{-N}/m^3$
Tasa de descomposición / lisis para bacterias heterótrofas	b_H	d^{-1}
Tasa máxima específica de crecimiento para bacterias autótrofas	μ_A	d^{-1}
Coefficiente de saturación media para bacterias autótrofas	K_{NH}	$g \text{ NO}_3\text{-N}/m^3$
Coefficiente de saturación media de demanda de oxígeno para bacterias autótrofas	$K_{O,A}$	$g \text{ O}_2 / m^3$
Tasa de descomposición para bacterias autótrofas	b_A	d^{-1}
Fracción de heterótrofos que usan nitrato en el crecimiento anóxico	n_g	adimensional
Tasa de amonificación	k_a	$m^3 (g \text{ biomasa } d)^{-1}$
Máxima tasa específica para la hidrólisis de componentes en partículas	$k_{o.}$	$g \text{ DQO lentamente degradada } (g \text{ biomasa } d)^{-1}$
Coefficiente de saturación media de hidrólisis	K_x	$g \text{ DQO lentamente degradada } (g \text{ biomasa})^{-1}$
Factor de corrección para la hidrólisis anóxica	n_h	adimensional

6.8 Ecuaciones de reacción de los procesos

De acuerdo las cinéticas de reacción propias de cada proceso de transformación y a la matriz, se tiene las ecuaciones de cada proceso, las cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 8. Ecuaciones de reacción de cada proceso	
<i>Proceso</i>	<i>Ecuación de Reacción</i>

Crecimiento aerobio de biomasa heterotrófica	$\rho_1 = \hat{\mu} \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H}$
Crecimiento anóxico de biomasa heterotrófica	$\rho_2 = \hat{\mu} \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \eta_g X_{B,H}$
Crecimiento aerobio de biomasa autotrófica	$\rho_3 = \hat{\mu}_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) X_{B,A}$
Decaimiento de biomasa heterotrófica	$\rho_4 = b_H X_{B,H}$
Decaimiento de biomasa autotrófica	$\rho_5 = b_A X_{B,A}$
Amonificación de nitrógeno orgánico soluble	$\rho_6 = k_a S_{ND} X_{B,H}$
Hidrólisis de materia orgánica atrapada	$\rho_7 = k_h \frac{X_S / X_{B,H}}{K_X + (X_S / X_{B,H})} \left[\left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right] X_{B,H}$
Hidrólisis de nitrógeno orgánico soluble atrapado	$\rho_8 = \rho_7 \left(\frac{X_{ND}}{X_S} \right)$

6.9 Ecuaciones de conversión del modelo

Las ecuaciones que describen el proceso, son un conjunto de ecuaciones ordinarias diferenciales, las cuales evidencian la complejidad del modelo, ratificando el uso de la matriz para simplificar su observación. El paquete esta conformado por 12 ecuaciones, cada una describe la transformación de los componentes dentro del proceso, el componente de alcalinidad no se describe.

$X_{B,H}$. Es uno de los componentes más importantes, el comportamiento dinámico de este elemento es afectado por tres procesos, el crecimiento aerobio, crecimiento anóxico y decaimiento, todos heterotróficos. La ecuación de cambio queda:

$$\frac{dX_{B,H}}{dt} = \hat{\mu}_H \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} X_{B,H} + \eta_g \hat{\mu}_H \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} X_{B,H} - b_H X_{B,H}$$

$X_{B,A}$. Con respecto a la bioma autótrofa, ésta se ve influenciada por el crecimiento y decaimiento de autótrofos, por lo que su ecuación de transformación es:

$$\frac{dX_{B,A}}{dt} = \hat{\mu}_A \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} X_{B,A} - b_A X_{B,A}$$

S_S . La concentración de sustrato rápidamente biodegradable es reducida por el crecimiento de bacteria heterótrofa en condiciones aerobias y anóxicas, mientras que presenta un aumento debido a la hidrólisis de sustrato lentamente biodegradable. Su ecuación diferencial queda:

$$\begin{aligned} \frac{dS_S}{dt} = & \left[-\frac{\hat{\mu}_H}{Y_H} \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left\{ \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) + \eta_g \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right\} \right. \\ & \left. + k_h \frac{X_S / X_{B,H}}{K_X + X_S / X_{B,H}} \left\{ \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right\} \right] X_{B,H} \end{aligned}$$

X_S . La concentración de sustrato lentamente biodegradable aumenta mediante el reciclaje del material muerto como se explicó con anterioridad y decrece debido a la hidrólisis.

$$\frac{dX_S}{dt} = (1 - f_p)(b_H X_{B,H} - b_A X_{B,A}) - k_h \frac{X_S / X_{B,H}}{K_X + X_S / X_{B,H}} \left\{ \frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} + \eta_h \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right\} X_{B,H}$$

X_P . La ecuación más sencilla de todo el modelo es la referente a los productos inertes en partícula quedando así:

$$\frac{dX_P}{dt} = f_p (b_H X_{B,H} - b_A X_{B,A})$$

X_{ND} . Con lo que respecta al nitrógeno orgánico en partícula, al igual que el sustrato lentamente biodegradable se ve incrementado por el decaimiento de la biomasa y decrece debido a la hidrólisis.

$$\frac{dX_{ND}}{dt} = (i_{XB} - f_p i_{XP}) (b_H X_{B,H} + b_A X_{B,A}) - k_h \frac{X_{ND}/X_{B,H}}{K_X + X_S/X_{B,H}} \left\{ \frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} + \eta_h \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right\} X_{B,H}$$

S_{ND} . El proceso de amonificación y el de hidrólisis son los únicos que afectan la concentración de nitrógeno orgánico soluble.

$$\frac{dS_{ND}}{dt} = \left[-k_a S_{ND} + k_h \frac{X_{ND}/X_{B,H}}{K_X + X_S/X_{B,H}} \left\{ \frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} + \eta_h \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right\} X_{B,H} \right]$$

S_{NH} . La concentración de amoníaco se ve afectada por el crecimiento de todos los microorganismos que lo usan como fuente para la formación de biomasa, así como por el proceso de nitrificación, sin embargo crece como resultado de la amonificación del nitrógeno orgánico soluble, lo que resulta en la siguiente ecuación.

$$\frac{dS_{NH}}{dt} = \left[-i_{XB} \hat{\mu}_H \frac{S_S}{K_S + S_S} \left\{ \frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} + \eta_g \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right\} + k_a S_{ND} \right] X_{B,H} - \hat{\mu}_A \left(i_{XB} + \frac{1}{Y_A} \right) \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) X_{B,A}$$

S_{NO} . Dos procesos intervienen en la transformación de nitrato, aumenta debido a la nitrificación y disminuye con la denitrificación.

$$\frac{dS_{NO}}{dt} = -\hat{\mu}_H \eta_g \frac{1 - Y_A}{2.86 Y_H} \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} X_{B,H} + \frac{\hat{\mu}_A}{Y_A} \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} X_{B,A}$$

S_O . El último componente descrito es la concentración de oxígeno, la cual se reduce debido al crecimiento de biomasa tanto heterotrófica como autotrófica de acuerdo a:

$$\frac{dS_O}{dt} = -\hat{\mu}_H \frac{1 - Y_H}{Y_H} \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} X_{B,H} - \hat{\mu}_A \frac{4.57 - Y_A}{Y_A} \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} X_{B,A}$$

6.10 Restricciones del modelo

Como en muchos modelos que describen ciertos procesos, existe una serie de simplificaciones y suposiciones empleadas por el ASM No.1, para poder hacer práctico su uso. Las restricciones del modelo antes presentado son:

- El sistema trabaja a temperatura constante.
- El pH es constante y tiene un valor neutro.
- Los coeficientes en las velocidades de reacción son constantes.
- No se consideran los posibles efectos en limitaciones de nitrógeno, fósforo y otros nutrientes inorgánicos, en la remoción de materia orgánica y en el crecimiento de biomasa.
- La biomasa heterótrofa es homogénea y no presenta cambios en la diversidad de especies con respecto al tiempo.
- La formación de flóculos de la materia orgánica es instantáneo.
- Los procesos de hidrólisis de materia orgánica y nitrógeno orgánico ocurren de manera paralela y con la misma velocidad.
- El tipo de receptor de electrón presente no afecta la pérdida de biomasa activa debido al decaimiento o al coeficiente de producción heterótrofos.