

ANEXO 1

MATRIZ DEL MODELO ASM1

Tabla A1. Matriz de Variables y procesos del modelo ASM1.

Componente	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Tasa de reacción, ρ_j [ML ⁻³ T ⁻¹]
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 aeróbico de heterótrofos.		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-Y_H}{Y_H}$		$-i_{XB}$			$-\frac{i_{XB}}{14}$	$\hat{\mu}_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H}$
2	Crecimiento anóxico de heterótrofos.		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-Y_H}{2.86Y_H}$		$-i_{XB}$			$\frac{1-Y_H}{14 \cdot 2.86Y_H} - \frac{i_{XB}}{14}$	$\hat{\mu}_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \eta_g X_{B,H}$
3	Crecimiento aeróbico de autótrofos.						1		$-\frac{4.57}{Y_A} + 1$	$\frac{1}{Y_A}$	$-i_{XB} - \frac{1}{Y_A}$			$-\frac{i_{XB}}{14} - \frac{1}{7Y_A}$	$\hat{\mu}_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) X_{B,A}$
4	"Descomposición" de los heterótrofos.				$1 - f_p$	-1		f_p					$i_{XB} - f_p i_{XP}$		$b_H X_{B,H}$
5	"Descomposición" de los autótrofos.				$1 - f_p$		-1	f_p					$i_{XB} - f_p i_{XP}$		$b_A X_{B,A}$
6	Amonificación de nitrógeno orgánico										1	-1		$\frac{1}{14}$	$k_a S_{ND} X_{B,H}$
7	"Hidrólisis" de compuestos orgánicos atrapados		1		-1										$k_h \frac{X_S/X_{B,H}}{K_X + (X_S/X_{B,H})} \dots$ $\dots \left[\left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right] X_{B,H}$
8	"Hidrólisis" del nitrógeno orgánico atrapado											1	-1		$\rho_7 \left(\frac{X_{ND}}{X_S} \right)$
Tasas de conversión observadas [ML ⁻³ T ⁻¹]		$r_i = \sum_j v_{ij} \rho_j$													
Parámetros estequiométricos:		<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>Materia orgánica inerte soluble [M(DQO)]L⁻³</p> <p>Sustrato fácilmente biodegradable [M(DQO)]L⁻³</p> <p>Partículas de materia orgánica inerte [M(DQO)]L⁻³</p> <p>Sustrato lentamente biodegradable [M(DQO)]L⁻³</p> <p>Biomasa heterótrofa activa [M(DQO)]L⁻³</p> <p>Biomasa autótrofa activa [M(DQO)]L⁻³</p> <p>Productos de partículas derivados de la descomposición de la biomasa [M(DQO)]L⁻³</p> <p>Oxígeno (DQO negativo) [M(-DQO)]L⁻³</p> <p>Nitrato y nitró [M(N)]L⁻³</p> <p>NH₄⁺NH₃ Nitrógeno [M(N)]L⁻³</p> <p>Nitrógeno orgánico biodegradable soluble [M(N)]L⁻³</p> <p>Nitrógeno orgánico biodegradable en partículas [M(N)]L⁻³</p> <p>Alcalinidad - Unidades molares</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>Parámetros Cinéticos:</p> <p>Crecimiento y descomposición heterótrofa: $\hat{\mu}_H, K_S, K_{O,H}, K_{NO}, b_H$</p> <p>Crecimiento y decadencia autótrofa: $\hat{\mu}_A, K_{NH}, K_{O,A}, b_A$</p> <p>Factor de corrección por crecimiento anóxico de heterótrofos: η_g</p> <p>Amonificación: k_a</p> <p>Hidrólisis: k_h, K_X</p> <p>Factor de corrección por hidrólisis anóxica: η_h</p> </div> </div>													
Rendimiento heterótrofo: Y_H															
Rendimiento autótrofo: Y_A															
Fracción de biomasa que produce productos particulados: f_p															
Masa N/Masa DQO en biomasa: i_{XB}															
Masa/Masa DQO en productos a partir de biomasa: i_{XP}															

Fuente: Henze et al., 2002.

ANEXO 2
PARÁMETROS DEL MODELO ASM1

Tabla A2. Parámetros cinéticos y estequiométricos del modelo ASM1.

Parámetros del modelo ASM1	Símbolo	Unidad	20°C	10°C	Literatura
Parámetros estequiométricos					
Rendimiento heterótrofo	Y_H	g DQO celular formado/g DQO oxidado	0.67	0.67	0.38-0.75
Rendimiento autótrofo	Y_A	g DQO celular formado/g DQO oxidado	0.24	0.24	0.07-0.28
Fracción de biomasa que produce productos particulados	f_p	adimensional	0.08	0.08	-
Masa N/masa DQO en biomasa	i_{XB}	g N/g DQO en biomasa	0.086	0.086	-
Masa N/masa DQO en productos de biomasa	i_{XP}	g N/g DQO en masa endógena	0.06	0.06	-
Parámetros cinéticos					
Velocidad de crecimiento heterótrofo máximo específico	μ_H	1/día	6	3	0.6-13.2
Velocidad de decaimiento heterótrofo	b_H	1/día	0.62	0.2	0.05-1.6
Coefficiente de saturación media para heterótrofos.	K_S	g DQO/m ³	20	20	5-225
Coefficiente de saturación media de oxígeno para heterótrofos	K_{OH}	g O ₂ /m ³	0.2	0.2	0.01-0.2
Coefficiente de saturación media de nitrato para heterótrofos desnitrificantes	K_{NO}	g NO ₃ -N/m ³	0.5	0.5	0.1-0.5
Velocidad de crecimiento autótrofo máximo específico	μ_A	1/día	0.8	0.3	0.2-1.0
Velocidad de decaimiento autótrofo	b_A	1/día	0.2	0.1	0.05-0.2
Coefficiente de saturación media de oxígeno para autótrofos	K_{OA}	g O ₂ /m ³	0.4	0.4	0.4-2.0
Coefficiente de saturación media de amonio para autótrofos	K_{NH}	g NH ₃ -N/m ³	1	1	-
Factor de corrección para crecimiento anoxico de heterótrofos	η_g	adimensional	0.8	0.8	0.6-1.0
Velocidad de amonificación	k_a	m ³ /g DQO/día	0.08	0.04	-
Velocidad de hidrólisis máxima específica	k_h	g DQO lentamente biod./g DQO cel/día	3	1	-
Coefficiente de saturación media para hidrólisis de sustrato lentamente biodegradable	K_X	g DQO lentamente biod./g DQO cel/día	0.03	0.01	-
Factor de corrección para hidrólisis anoxia	η_h	adimensional	0.4	0.4	-

Fuente: Henze et al, 2002.

ANEXO 3

TIPOS DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO PARA AGUAS RESIDUALES

Tabla A3. Principales procesos de tratamiento biológico usado para aguas residuales.

Tipo	Nombre común	Uso
Procesos aerobios		
Crecimiento suspendido	Proceso de lodos activados	Remoción de DBO, nitrificación
	Lagunas aireadas	Remoción de DBO, nitrificación
	Digestión aerobia	Estabilización, remoción de DBO
	Biorreactor de membrana ^(a)	Remoción de DBO, nitrificación
	Filtros biológicos aireados	Remoción de DBO, nitrificación
Crecimiento fijo	Biorreactor de lecho móvil ^(b)	Remoción de DBO, nitrificación
	Reactores con lecho empacado	Remoción de DBO, nitrificación
	Contactores rotativos biológicos	Remoción de DBO, nitrificación
	Filtros de goteo	Remoción de DBO, nitrificación
Procesos híbridos	Filtro de goteo/lodos activos	Remoción de DBO, nitrificación
	Lodos activos de película fija integrada ^(c)	Remoción de DBO, nitrificación
Procesos anoxios		
Crecimiento suspendido	Desnitrificación de crecimiento suspendido	Desnitrificación
Crecimiento fijo	Filtro de desnitrificación de crecimiento suspendido	Desnitrificación
Procesos anaerobios		
Crecimiento suspendido	Procesos de contacto anaerobio	Remoción de DBO
	Digestión anaerobia	Estabilización, destrucción de sólidos, muerte de patógenos
	Proceso Anammox	Desnitrificación, remoción de amonio
Crecimiento fijo	Lecho fluidizado y empacado anaerobio	Remoción de DBO, estabilización de residuos, desnitrificación
Manta de lodos	Manta de lodo anaeróbico de flujo ascendente ^(d)	Remoción de DBO, especialmente residuos altamente resistentes
Híbrido	Manta de lodo de flujo ascendente/crecimiento fijo	Remoción de DBO

Procesos combinados aerobios, anoxios y anaerobios		
Crecimiento suspendido	Procesos simples o de múltiples etapas, procesos patentados	Remoción de DBO, nitrificación, desnitrificación y remoción de fósforo
Híbrido	Procesos de crecimiento suspendido simple o de múltiples etapas con medios de película fija	Remoción de DBO, nitrificación, desnitrificación y remoción de fósforo
Procesos de lagunas		
Lagunas aerobias	Lagunas aerobias	Remoción de DBO, nitrificación
Lagunas de maduración (terciarias)	Lagunas de maduración (terciarias)	Remoción de DBO, nitrificación
Lagunas facultativas	Lagunas facultativas	Remoción DBO
Lagunas anaerobias	Lagunas anaerobias	Remoción de DBO (estabilización de residuos)

^(a)MBR

^(b)MBBR

^(c)IFAS

^(d)UASB

Fuente: Metcalf y Eddy, 1995

ANEXO 4

CONCENTRACIONES TÍPICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

Tabla A4. Características típicas de las aguas residuales municipales.

Características del agua residual	Concentraciones	Unidad de concentraciones	Fracciones	Unidad de fracciones
Material orgánico				
DBO	230 - 560	g DBO/m ³	-	-
DBO soluble	200 - 480	g DBO/m ³	-	-
DQO Total	500 - 1200	g DQO/m ³	-	-
DQO suspendida	300 - 720	g DQO/m ³	0.25 - 0.60	g DQO/g DQOt
Ácidos grasos volátiles				
AGV (como acetato)	10 - 80	g/m ³	-	-
Material nitrogenado				
N total	30 - 100	g N/m ³	-	-
N Amoniacal	20 - 75	g N/m ³	0.20 - 0.75	g N/g Nt
N Nitrato + Nitrito	0.1 - 0.5	g N/m ³	0 - 0.01	g N/g Nt
N Orgánico	15 - 25	g N/m ³	0.15 - 0.25	g N/g Nt
N Total Kjeldahl	30 - 100	g N/m ³	0.3 - 1.00	g N/g Nt
Material fosforado				
P total	6 - 25	g P/m ³	-	-
Ortho-P	4 - 15	g P/m ³	0.16 - 0.60	g P/ gPt
P orgánico	2 - 10	g P/m ³	0.08 - 0.40	g P/ gPt
Sólidos Suspendidos				
SST	250 - 600	g/m ³	-	-
SSV	200 - 480	g/m ³	0.33 - 0.80	g SSV/g SST

Fuente: Adaptado de Henze et al., 2008.

ANEXO 5
RELACIONES MÁSCAS TÍPICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES
MUNICIPALES

Tabla A5. Síntesis de las relaciones típicas de PTAR municipales a partir del cuestionario GMP.

	Relación	Unidad	n^(a)	Media	Std%^(b)	Mínimo	Máximo
Afluente crudo	N_{tot}/DQO_{tot}	g N/ g DQO	12	0.095	17%	0.050	0.150
	$N-NH_x/NTK$	g N/g N	13	0.684	8%	0.500	0.900
	P_{tot}/DQO_{tot}	g P/g DQO	12	0.016	22%	0.007	0.025
	$P-PO_4/P_{tot}$	g P/g P	12	0.603	16%	0.390	0.800
	DQO_{tot}/DBO_5	g DQO/g DBO	12	2.06	11%	1.410	3.000
	DQO_{fil}/DQO_{tot}	g DQO/g DQO	13	0.343	29%	0.120	0.750
	SST/DQO_{tot}	g SST/g DQO	12	0.503	18%	0.350	0.700
	DQO_{part}/SSV	g DQO/g SSV	11	1.69	12%	1.300	3.000
	SSV/SST	g SS/g SS	12	0.74	20%	0.300	0.900
	DBO_5/DBO_u	g DBO/g DBO	7	0.655	7%	0.580	0.740
	Alcalinidad	mol-eq/L	11	5.173	35%	1.500	9.000
Efluente primario	N_{tot}/DQO_{tot}	g N/ g DQO	9	0.134	35%	0.050	0.360
	$N-NH_x/NTK$	g N/g N	11	0.755	4%	0.430	0.900
	P_{tot}/DQO_{tot}	g P/g DQO	9	0.023	25%	0.010	0.060
	$P-PO_4/P_{tot}$	g P/g P	10	0.741	12%	0.500	0.900
	DQO_{tot}/DBO_5	g DQO/g DBO	9	1.874	31%	0.500	3.000
	DQO_{fil}/DQO_{tot}	g DQO/g DQO	10	0.449	31%	0.150	0.750
	SST/DQO_{tot}	g SST/g DQO	9	0.38	21%	0.180	0.560
	DQO_{part}/SSV	g DQO/g SSV	9	1.718	14%	1.400	3.500
	SSV/SST	g SS/g SS	9	0.794	7%	0.700	0.909
	DBO_5/DBO_u	g DBO/g DBO	6	0.644	10%	0.533	0.760
	Alcalinidad	mol-eq/L	9	5.711	40%	1.500	9.000
Lodos activados	DQO_{tot}/SSV	g DQO/g SS	9	1.434	7%	1.266	1.600
	N_{tot}/DQO_{tot}	g N/ g DQO	7	0.073	35%	0.045	0.116
	P_{tot}/DQO_{tot}	g P/g DQO	7	0.02	64%	0.010	0.044
	SSV/SST	g SS/g SS	10	0.739	8%	0.650	0.900

(a) Número de respuestas de plantas de tratamiento.

(b) Desviación Estándar en (%)

Fuente: Adaptado Rieger et al., 2013.

ANEXO 6

SUBMODELOS INVOLUCRADOS EN EL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS

Tabla A6. Submodelos comunes en un proceso de lodos activados.

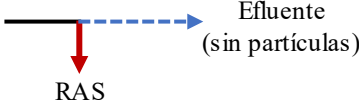
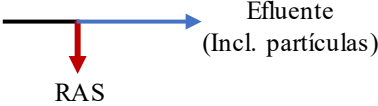
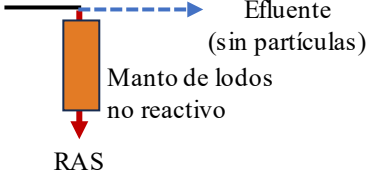
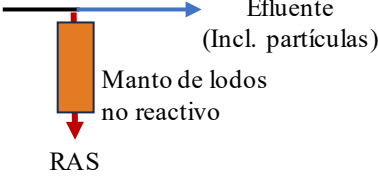
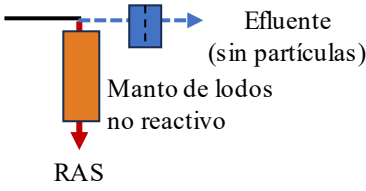
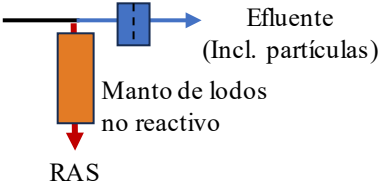
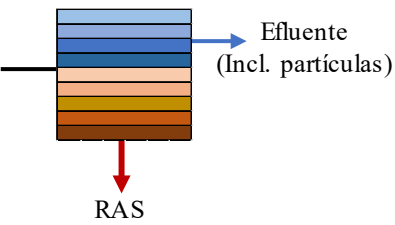

Tipo de submodelo	Submodelos
Modelos hidráulicos y transporte	Modelos de reactor (ej. CSTR con volumen fijo o variable).
	Esquema de flujo: configuración y combinación de reactor (ej. tanques en serie).
	Flujos de lodo activado de retorno (RAS) y de reciclo interno (IR).
	Flujo de lodos activados de rechazo (WAS).
	Separador de flujo: fracción, flujo, bypass, etc.
Modelos de clarificador	Modelos de clarificador punto.
	Modelos de clarificador ideal.
	Modelos de clarificador por capas (imitando una sedimentación unidimensional).
	Modelos de clarificador CFD de más dimensiones (no disponible en simulaciones comerciales).
	Modelos de clarificador reactivo (acoplado con modelo biocinético).
Modelos de entrada	Modelo del afluente para convertir medidas como DQO total, NTK, P a componentes del modelo (variables de estado).
	Configuraciones operacionales y otras entradas.
	Constantes (ej. Set-points de controladores)
	Entradas de energía para aireadores superficiales u otras unidades de proceso.
Modelos de salida	Variables combinadas o compuestas (ej. DQO total, DBO, SST, etc).
	Modelos de energía y costos.
Modelos biocinéticos	Ej. ASM1/2d/3, etc.
	Dependencia de la temperatura (ecuación de Arrhenius).
Modelos de aireación	Modelo para traducir el flujo de aire en kLa.
	Modelo de transferencia de oxígeno.
	Modelos de equipos de aireación (difusores, tuberías, sistema del soplador).
Modelos prec. de fósforo	Dosis de sales de hierro o aluminio.
	Precipitación de fosfato de calcio y magnesio.
Otros submodelos	Modelos de controladores, sensores, actuadores.
	pH
	Transferencia de gas.
	Submodelos del modelado de toda la planta (ej. Modelo de primarios, digestores anaerobios, manejo de lodo, etc).
	Modelos para entalpía (temperatura), costos operacionales, energía, huella de carbono, conversión de emisiones de gases de efecto invernadero en unidades de carbono, etc)

Fuente: Adaptado de López Amesquita, 2021.

ANEXO 7

MODELOS TÍPICOS DE CLARIFICADORES PARA LA SIMULACION CON ASM

Tabla A7. Modelos comunes de clarificadores.

	Separación completa de partículas	Pérdida de partículas
a) Modelos de clarificador punto		
		
b) Modelos de clarificador ideal (con volumen)		
Volumen para almacenamiento de lodos		
Volumen para almacenamiento de lodos y agua clarificada		
c) Modelos de clarificador en capas		
Unidimensional o modelos de flux		
d) Modelos CFD de más dimensiones		
Típicamente no disponible en simuladores de PTAR		
e) Modelos de clarificador reactivo		
Aplicable para modelos con volumen descritos arriba		

Fuente: Adaptado de Rieger et al., 2013.

ANEXO 9

PERFILES HORARIOS DE CAUDALES DE PURGA Y RECIRCULACIÓN (FECHA 19/02/2023)

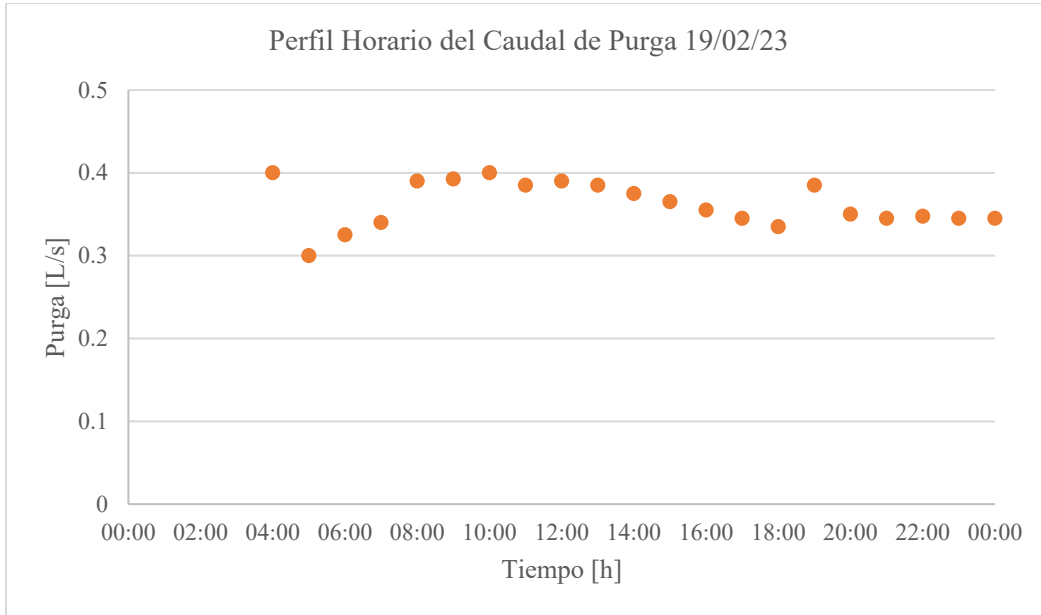


Figura A9.1. Perfil horario del caudal de purga de lodos de la PTAR San Blas.

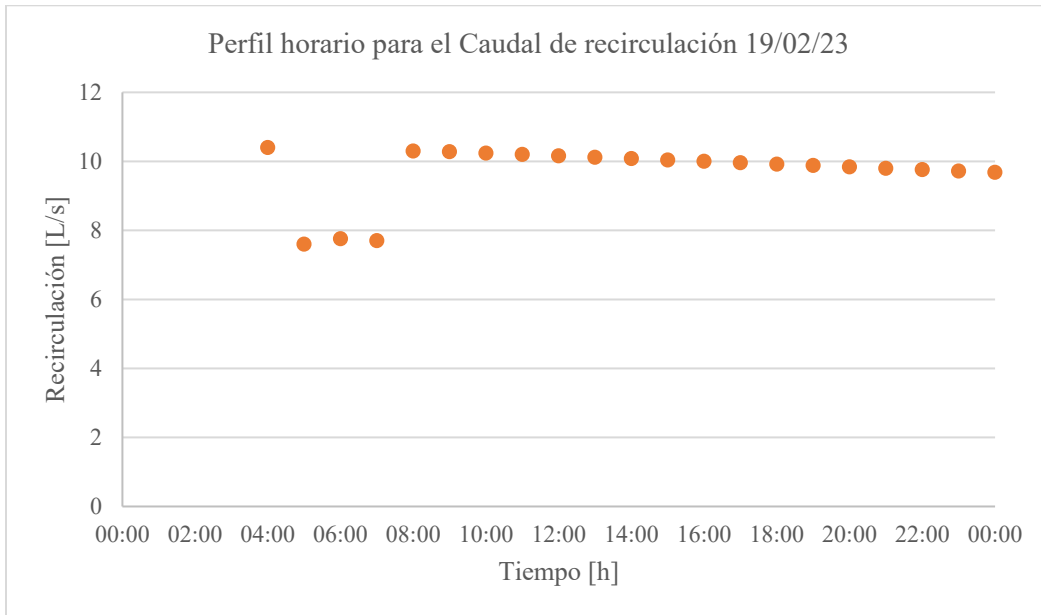


Figura A9.2. Perfil horario del caudal de recirculación de la PTAR San Blas.

ANEXO 10

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOS DATOS RECOPIADOS DE CAUDALES Y CONSUMOS DE LA PTAR SAN BLAS

Tabla A10.1. Estadística de los caudales del afluente, efluente y recirculación del mes de febrero de 2023

Estadístico	Afluente L/s	Efluente L/s	Reciclo L/s	Purga L/s
Promedio	62.72	61.84	0.38	0.71
Máximo	62.72	69.21	0.77	1.10
Mínimo	62.72	54.30	0.00	0.50
Desv. Estándar	0.00	4.07	0.26	0.15
CV (%)	0.00	6.59	69.06	21.41
Número datos	1.00	22	28	20

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 11

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOS DATOS RECOPIADOS DE CAUDALES CONCENTRACIONES DE LA PTAR SAN BLAS

Tabla A11.1. Estadística de las concentraciones de materia orgánica, particulada y nitrogenada del afluente (febrero).

Estadístico	DQO total g/m ³	DBO ₅ g/m ³	SST g SS/m ³	SSV g SS/m ³	N total g N/m ³	NTK g N/m ³	N-NO ₃ g N/m ³
Promedio	238.20	100.09	84.55	67.13	81.11	35.59	11.22
Máximo	238.20	100.09	84.55	67.13	81.11	35.59	11.22
Mínimo	238.20	100.09	84.55	67.13	81.11	35.59	11.22
Desv. Estándar	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CV (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Número datos	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A11.2. Estadística de las concentraciones de materia orgánica, particulada y nitrogenada del efluente (febrero).

Estadístico	DQO total g/m ³	DBO ₅ g/m ³	SST g SS/m ³	SSV g SS/m ³	N total g N/m ³	NTK g N/m ³	N-NO ₃ g N/m ³
Promedio	94.00	8.68	13.85	10.23	28.08	26.75	13.64
Máximo	126.00	14.00	24.00	17.74	30.15	48.30	20.34
Mínimo	72.00	3.20	8.00	5.91	22.20	14.40	10.83
Desv. Estándar	15.13	4.34	4.17	3.08	3.92	15.01	4.52
CV (%)	16.09	49.98	30.10	30.10	13.97	56.10	33.12
Número datos	18	8	20	20	4	4	4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A11.3. Estadística de las concentraciones de sólidos en los reactores A y B, y la recirculación (entre abril, mayo)

Estadístico	Reactor A		Reactor B		Recirculación	
	SST g SS/m ³	SSV g SS/m ³	SST g SS/m ³	SSV g SS/m ³	SST g SS/m ³	SSV g SS/m ³
Promedio	306.56	226.54	293.56	216.94	4973.35	3680.28
Máximo	451.00	333.29	546.00	403.49	10513.36	7779.89
Mínimo	150.00	110.85	75.00	55.43	1765.81	1306.70
Desv. Estándar	97.85	72.31	129.77	95.90	2795.52	2068.68
CV (%)	31.92	31.92	44.21	44.21	56.21	56.21
Número datos	18	18	18	18	16	16

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 12

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOS DATOS RECOPIADOS DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES DE LA PTAR SAN BLAS

Tabla A12.1. Estadística del pH, temperatura y OD del afluente y efluente del mes de febrero

Estadístico	Afluente			Efluente		
	pH* uds.	Temp* °C	OD* g O ₂ /m ³	pH* uds.	Temp* °C	OD* g O ₂ /m ³
Promedio	7.62	22.32	0.03	7.25	22.42	5.15
Máximo	8.54	23.20	0.10	7.88	23.40	5.90
Mínimo	7.01	21.70	0.00	6.90	21.30	4.65
Desv. Estándar	0.40	0.46	0.04	0.28	0.59	0.37
CV (%)	5.23	2.05	116.65	3.80	2.62	7.28
Número datos	21	19	20	20	19	18

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A12.2. Estadística del pH, temperatura y OD del reactor A y B del mes de febrero

Estadístico	Reactor A			Reactor B		
	pH* uds.	Temp* °C	OD* g O ₂ /m ³	pH* uds.	Temp* °C	OD* g O ₂ /m ³
Promedio	6.77	21.98	2.00	6.74	22.03	2.00
Máximo	7.47	23.20	2.00	7.44	23.30	2.00
Mínimo	6.30	20.00	2.00	6.23	20.00	2.00
Desv. Estándar	0.30	0.90	0.00	0.33	0.94	0.00
CV (%)	4.41	4.09	0.00	4.94	4.27	0.00
Número datos	16	15	18	18	15	18

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 13

BALANCES DE MASA DE SST PARA EL AJUSTE DE LOS CAUDALES DE LA PTAR SAN BLAS

Tabla A13. Balances de masa respecto a los SST para el ajuste de los caudales del sistema de lodos activados de la PTAR San Blas

Ecuación	Flujo	Q _{in} L/s	Q _{aj} L/s	Q _{aj} m ³ /d	SST g/m ³	Q _{aj} *SST kg/d	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q ₂ - Q ₃	Q ₄	68.12	68.12	5885.50	84.55	497.63	497.63		
Q ₁₀	Q ₈	61.84	67.15	5801.59	13.85	80.32	-80.32		-80.32
	Q ₉	0.71	0.97	83.89	4973.35	417.24	-417.24		
	Q ₇	0.38	3.14	271.38	4973.35	1349.68			
Q ₄ + Q ₇	Q ₅	68.50	71.26	6156.88	300.04	1847.31		1847.31	
Q ₅	Q ₆	68.50	71.26	6156.88	300.06	1847.41		-1847.41	1847.41
Q ₆ - Q ₈	Q ₁₁	6.66	4.11	355.29	4973.35	1766.98			-1766.98
Entradas (kg/d)	-	-	-	-	-	-	497.63	1847.31	1847.41
Salidas (kg/d)	-	-	-	-	-	-	-497.56	-1847.41	-1847.31
Diferencia (kg/d)	-	-	-	-	-	-	0.07	-0.09	0.10
Desviación (%)	-	-	-	-	-	-	0.01	0.00	0.01

Nota. Q_{in}: Valor inicial de caudal (sin cambios). Q_{aj}: Valor ajustados de caudales.

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 14

EXPRESIONES CINÉTICAS Y BALANCES DE MASA DEL MODELO ASM1

De la matriz de Henze et al. (2002), presentada en su segunda tabla de la publicación, Tabla A.1, se desarrollan las expresiones cinéticas (velocidades de conversión) para cada una de las variables de estado del modelo ASM1.

A14.1. Lista de procesos.

De acuerdo con la matriz, la velocidad de cada procesos (ρ_j) se expresa a continuación:

- $j = 1$, crecimiento aerobio de heterótrofos.

$$\rho_1 = \hat{\mu}_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H}$$

- $j = 2$, crecimiento anóxico de heterótrofos.

$$\rho_2 = \hat{\mu}_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{O,H} + S_{NO}} \right) \eta_g \cdot X_{B,H}$$

- $j = 3$, crecimiento aerobio de autótrofos.

$$\rho_3 = \hat{\mu}_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) X_{B,A}$$

- $j = 4$, decaimiento de heterótrofos.

$$\rho_4 = b_H \cdot X_{B,H}$$

- $j = 5$, decaimiento de autótrofos.

$$\rho_5 = b_A \cdot X_{B,A}$$

- $j = 6$, amonificación de nitrógeno orgánico soluble.

$$\rho_6 = k_a \cdot S_{ND} \cdot X_{B,H}$$

- $j = 7$, hidrólisis de orgánicos atrapados.

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

- $j = 8$, hidrólisis de nitrógeno orgánico entrampado.

$$\rho_8 = \rho_7(X_{ND}/X_S)$$

A14.2. Velocidades de conversión.

Se determina la velocidad de conversión de cada componente del modelo ASM1 (r_i), sumando el producto de los coeficientes estequiométricos (v_{ij}) de la columna respectiva con cada uno de los procesos que afecta la concentración del componente (ρ_j). Matemáticamente:

$$r_i = \sum_j v_{ij} \rho_j$$

A continuación, se expresa la velocidad de conversión de cada componente:

- S_I (i=1)

$$r_1 = 0$$

- S_S (i=2)

$$r_2 = -\frac{1}{Y_H} \cdot \rho_1 - \frac{1}{Y_H} \cdot \rho_2 + \rho_7$$

- X_I (i=3)

$$r_3 = 0$$

- X_S (i=4)

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

- X_{BH} (i=5)

$$r_5 = \rho_1 + \rho_2 - \rho_4$$

- X_{BA} (i=6)

$$r_6 = \rho_3 - \rho_5$$

- X_P (i=7)

$$r_7 = f_P \cdot \rho_3 + f_P \cdot \rho_5$$

- S_O (i=8)

$$r_8 = -\frac{1 - Y_H}{Y_H} \cdot \rho_1 - \frac{4.57 - Y_A}{Y_A} \cdot \rho_3$$

- S_{NO} (i=9)

$$r_9 = -\frac{1 - Y_H}{2.86 \cdot Y_H} \cdot \rho_2 + \frac{1}{Y_A} \cdot \rho_3$$

- S_{NH} (i=10)

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

- S_{ND} (i=11)

$$r_{11} = -\rho_6 + \rho_8$$

- X_{ND} (i=12)

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

- S_{SALK} (i=13)

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

A14.3. Balances de masa

Se realizaron balances de masa por componente (i) y balances de caudales.

a) Balances de masa por componente

- Reactor k=1:

Componentes solubles:

$$\frac{dC_{1,i}}{dt} = \frac{1}{V_1} (Q_0 \cdot C_{i,0} + Q_{ras} \cdot C_{i,ras} + r_1 \cdot V_1 - Q_1 \cdot C_{i,1})$$

Componentes particulados:

$$\frac{dC_{1,i}}{dt} = \frac{1}{V_1} \left(Q_0 \cdot C_{i,0} + (Q_0 + Q_{ras}) \cdot C_{i,n} - \left(\frac{\sum_{k=1}^n V_k \cdot X_{tot}}{SRT} \right) \left(\frac{C_{i,n}}{X_{tot,n}} \right) + r_1 \cdot V_1 - Q_1 \cdot C_{i,1} \right)$$

- Reactor k=2 hasta 6:

$$\frac{dC_{i,k}}{dt} = \frac{1}{V_k} (Q_{k-1} \cdot C_{i,k-1} + r_k \cdot V_k - Q_k \cdot C_{i,k})$$

- Caso especial para el oxígeno (S_O):

$$\frac{dS_{O,k}}{dt} = \frac{1}{V_k} (Q_{k-1} \cdot S_{O,k-1} + r_k \cdot V_k + (K_L a)_k V_k (S_O^* - S_{O,k}) - Q_k \cdot S_{O,k})$$

Donde la concentración de saturación para el oxígeno es: $S_O^* = 8.637 \text{ g/m}^3$

- Clarificador secundario

Componentes solubles:

$$C_{i,n} = C_{i,e} = C_{i,u}$$

Componentes particulados:

$$C_{i,u} = C_{i,ras} = C_{i,was}$$

b) Balances de caudal

- Reactor k=1: $Q_1 = Q_0 + Q_r$
- Reactor k=2 hasta 6: $Q_{k-1} = Q_k$
- Clarificador secundario: $Q_n = Q_e + Q_u$
 $Q_u = Q_{ras} + Q_{was}$

A14.4. Otras ecuaciones.

Se muestran también las ecuaciones de SRT y eficiencia de remoción, que no han podido ser mostradas hasta ahora en su forma general.

a) Tiempo de retención de sólidos.

$$SRT = \frac{\sum_{k=1}^n V_k \cdot X_{tot,k}}{Q_e \cdot SST_e + Q_{was} \cdot SST_{was}}$$

b) Eficiencia de remoción.

$$r = \frac{Q_n \cdot X_{tot,n} + Q_e \cdot X_{tot,e}}{Q_n \cdot X_{tot,n}}$$

ANEXO 15

MODELO *CODFRACTIONS* DEL INFLUENT ADVISOR

En esta sección se detalla el modelo *CODfractions* del Influent Advisor perteneciente al software GPS-X. La información mostrada aquí fue recopilada a partir de la descripción del software realizado por Loaiza (2007). En la Figura A15.1 se muestra un esquema de la relación entre las variables compuestas con las variables de estado ASM1, mientras que en la Tabla A15.1 se presentan todos los coeficientes estequiométricos y las ecuaciones involucradas para el cálculo de las variables de estado del modelo y algunas variables compuestas de interés.

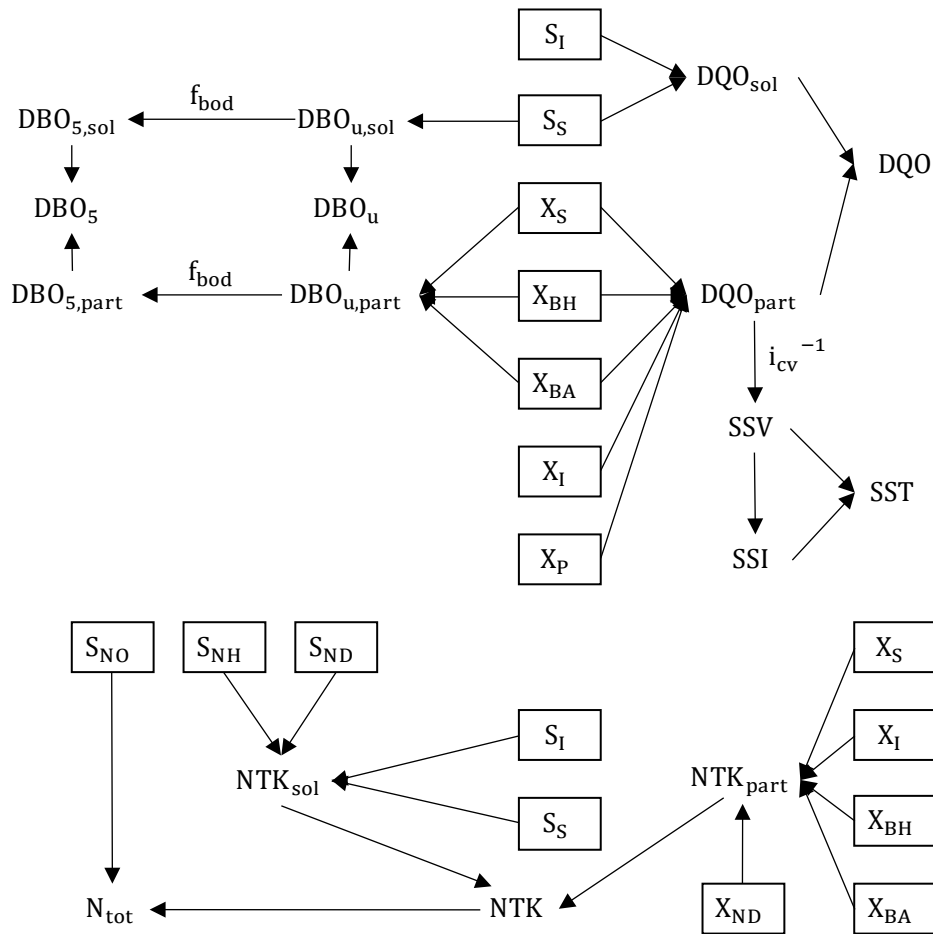


Figura A15.1. Variables ASM1 y compuestas de fracciones de materia orgánica y nitrogenada.

Fuente: Adaptado de Loaiza Navia, 2007.

Tabla A15. Coeficientes y ecuaciones para calcular variables ASM1 y compuestas.

Coefficiente	Significado	Fórmula de cálculo
icv	Relación DQO_{part}/SSV	Entrada
fbod	Relación DBO_5/DBO_U	Entrada
ivt	Relación SSV/SST	Entrada
frsi	Fracción inerte soluble de DQO_{tot}	Entrada
frss	Fracción rápidamente biodegradable de DQO_{tot}	Entrada
frxi	X_I/DQO_{tot}	Entrada
frxp	X_P/DQO_{tot}	Entrada
frxbh	X_{BH}/DQO_{tot}	Entrada
frxba	X_{BA}/DQO_{tot}	Entrada
frsnh	S_{NH}/NTK_{sol}	Entrada
ixb	i_{XB} (ASM1)	Entrada
ixp	i_{XP} (ASM1)	Entrada
inxS	X_{ND}/X_S	Entrada
Variables ASM1	Significado	Fórmula de cálculo
S_I	Material orgánico inerte soluble	$S_I = frsi * DQO_{tot}$
S_S	Sustrato rápidamente biodegradable	$S_S = frss * DQO_{tot}$
X_I	Material orgánico inerte soluble	$X_I = frxi * DQO_{tot}$
X_S	Sustrato lentamente biodegradable	$X_S = (1 - frss - frsi - frxi - frxp - frxbh - frxba) * DQO_{tot}$
X_{BH}	Biomasa heterótrofa activa	$X_{BH} = frxbh * DQO_{tot}$
X_{BA}	Biomasa autótrofa activa	$X_{BA} = frxba * DQO_{tot}$
X_P	Partículas no biodegradables del decaimiento	$X_{IP} = frxp * DQO_{tot}$
S_{ND}	Nitrógeno orgánico biodegradable soluble	$S_{ND} = NTK_{sol} - S_{NH}$
X_{ND}	Nitrógeno orgánico biodegradable particulado	$X_{ND} = inxS * X_S$
Variables compuestas	Significado	Fórmula de cálculo
$DBO_{5,sol}$	DBO_5 soluble (filtrada)	$DBO_{sol} = fbod * DBO_{u,sol}$
$DBO_{5,part}$	DBO_5 particulada	$DBO_{part} = fbod * DBO_{u,part}$
$DBO_{u,sol}$	DBO última soluble	$DBO_{u,sol} = S_S$
$DBO_{u,part}$	DBO última particulada	$DBO_{u,part} = X_{BH} + X_{BA} + X_S$
$DBO_{u,tot}$	DBO última total	$DBO_{u,tot} = DBO_{u,sol} + DBO_{u,part}$
DQO_{sol}	DQO soluble	$DQO_{sol} = (frss + frsi) * DQO_{tot}$
DQO_{part}	DQO particulada	$DQO_{part} = DQO_{tot} - DQO_{sol}$
NTK_{tot}	NTK total	$NTK_{tot} = S_{NH} + S_{ND} + X_{ND}$
NTK_{sol}	NTK soluble	$NTK_{sol} = S_{NH} / frsnh$
NTK_{part}	NTK particulada	$NTK_{part} = NTK_{tot} - NTK_{sol}$
N_{tot}	Nitrógeno total	$N_{tot} = NTK_{tot} + S_{NO}$

ANEXO 16

CÓDIGO EN MATLAB® DEL PROGRAMA DE SIMULACION DE LA PTAR DE SAN BLAS

El programa informático para la simulación de la PTAR de San Blas consta de tres scripts dependientes entre sí: ASM1_cstr.m, ASM1_ptar.m y ASM1_solver.m cuyos códigos, escritos en MATLAB®, son mostrados a continuación.

A16.1. Programa ASM1_cstr.m

```
function [C0,fco] = ASM1_cstr(Ci,c0,op,parm)
    options =
    optimoptions('fsolve','Display','off','MaxFunEvals',13000000,'MaxIter',1000000);
    [C0,fco] = fsolve(@nonlineq,c0,options);

function dCdt=nonlineq(C)
    dCdt=zeros(13,1);

    %Parámetros operacionales
    %=====
    Qi=op(1)*3.6*24; %m3/d
    QR=op(2)*3.6*24; %m3/d
    Q1=Qi+QR; %m3/d
    V=op(3);
    SRT=op(4);
    SOsat=op(7);
    SO=op(8);
    KLa=C(8);

    %Parámetros estequiométricos y cinéticos
    %=====
    YH=parm(1); YA=parm(2); fp=parm(3); iXB=parm(4); iXP=parm(5);
    uH=parm(6); KS=parm(7); KOH=parm(8); KNO=parm(9); bH=parm(10);
    uA=parm(11); KNH=parm(12); KOA=parm(13); bA=parm(14); ng=parm(15);
    ka=parm(16); kh=parm(17); KX=parm(18); nh=parm(19);

    %Tasa de procesos (pj)
    %=====
    p1 = uH*(C(2)/(KS+C(2)))*(SO/(KOH+SO))*C(5);
    p2 = uH*(C(2)/(KS+C(2)))*(KOH/(KOH+SO))*(C(9)/(KNO+C(9)))*ng*C(5);
    p3 = uA*(C(10)/(KNH+C(10)))*(SO/(KOA+SO))*C(6);
    p4 = bH*C(5);
    p5 = bA*C(6);
    p6 = ka*C(11)*C(5);
    p7 =
    kh*((C(4)/C(5))/(KX+C(4)/C(5)))*((SO/(KOH+SO))+nh*(KOH/(KOH+SO))*(C(9)/(KNO+C(9)
    )))*C(5);
    p8 = p7*C(12)/C(4);

    %Tasas de conversión (ri)
    %=====
```



```

r1 = 0; %rSI
r2 = (-1/YH)*p1+(-1/YH)*p2+p7; %rSS
r3 = 0; %rXI
r4 = (1-fp)*p4+(1-fp)*p5-p7; %rXS
r5 = p1+p2-p4; %rXBH
r6 = p3-p5; %rXBA
r7 = fp*p4+fp*p5; %rXP
r8 = -((1-YH)/YH)*p1-((4.57-YA)/YA)*p3; %rSO
r9 = -((1-YH)/(2.86*YH))*p2+(1/YA)*p3; %rSNO
r10 = -iXB*p1-iXB*p2-(iXB+1/YA)*p3+p6; %rSNH
r11 = -p6+p8; %rSND
r12 = (iXB-fp*iXP)*p4+(iXB-fp*iXP)*p5-p8; %rXND
r13 = (-iXB/14)*p1+((1-YH)/(14*2.86*YH)-iXB/14)*p2-
(iXB/14+1/(7*YA))*p3+(1/14)*p6; %rSALK

%Balances de masa por componente(estado estacionario, dCdt=0)
%=====
dCdt(1) = (Qi*Ci(1)+QR*C(1)-Q1*C(1)+r1*V)/V; %dSI/dt=0
dCdt(2) = (Qi*Ci(2)+QR*C(2)-Q1*C(2)+r2*V)/V; %dSS/dt=0
dCdt(3) = (Qi*Ci(3)-V*C(3)/SRT+r3*V)/V; %dXI/dt=0op(3)
dCdt(4) = (Qi*Ci(4)-V*C(4)/SRT+r4*V)/V; %dXS/dt=0
dCdt(5) = (Qi*Ci(5)-V*C(5)/SRT+r5*V)/V; %dXBH/dt=0
dCdt(6) = (Qi*Ci(6)-V*C(6)/SRT+r6*V)/V; %dXBA/dt=0
dCdt(7) = (Qi*Ci(7)-V*C(7)/SRT+r7*V)/V; %dXP/dt=0
dCdt(8) = (Qi*Ci(8)+QR*SO-Q1*SO+r8*V+KLa*V*(SOsat-SO))/V; %dSO/dt=0
dCdt(9) = (Qi*Ci(9)+QR*C(9)-Q1*C(9)+r9*V)/V; %dSNO/dt=0
dCdt(10) = (Qi*Ci(10)+QR*C(10)-Q1*C(10)+r10*V)/V; %dSNH/dt=0
dCdt(11) = (Qi*Ci(11)+QR*C(11)-Q1*C(11)+r11*V)/V; %dSND/dt=0
dCdt(12) = (Qi*Ci(12)-V*C(12)/SRT+r12*V)/V; %dXND/dt=0
dCdt(13) = (Qi*Ci(13)+QR*C(13)-Q1*C(13)+r13*V)/V; %dSALK/dt=0
end
end
end

```

A16.2. Programa ASM1_ptar.m

```

function [t,Ct,rate] = ASM1_ptar(Ci,c0,op,parm)
tspan = [0,op(10)];
h=0.001; ti=tspan(1);tf=tspan(2); t=(ti:h:tf)'; n = length(t);
N=op(5); ne=N*13; %N=#CSTRs, ne=#EDOs
C0=zeros(1,ne); C0(1:13)=c0;
for r=1:N-1
    C0((13*r+1):13*(r+1))=c0;
end
C0(8+13*(N-1))=op(8);
Ct = ones(n,1)*C0; %Matriz de variables en tspan
c=zeros(13,N); %Matriz de variables en tiempo t
for u = 1:n-1 %Implementando método de Euler
    c(:,1)=Ct(u,1:13)';
    for p=1:N-1
        c(:,p+1)=Ct(u,(13*p+1):13*(p+1))';
    end
    [g,rate]=EDO(c,op,parm);
end

```

```

r1 = 0; %rSI
r2 = (-1/YH)*p1+(-1/YH)*p2+p7; %rSS
r3 = 0; %rXI
r4 = (1-fp)*p4+(1-fp)*p5-p7; %rXS
r5 = p1+p2-p4; %rXBH
r6 = p3-p5; %rXBA
r7 = fp*p4+fp*p5; %rXP
r8 = -((1-YH)/YH)*p1-((4.57-YA)/YA)*p3; %rSO
r9 = -((1-YH)/(2.86*YH))*p2+(1/YA)*p3; %rSNO
r10 = -iXB*p1-iXB*p2-(iXB+1/YA)*p3+p6; %rSNH
r11 = -p6+p8; %rSND
r12 = (iXB-fp*iXP)*p4+(iXB-fp*iXP)*p5-p8; %rXND
r13 = (-iXB/14)*p1+((1-YH)/(14*2.86*YH)-iXB/14)*p2-
(iXB/14+1/(7*YA))*p3+(1/14)*p6; %rSALK

%Balances de masa por componente(estado estacionario, dCdt=0)
%=====
dCdt(1) = (Qi*Ci(1)+QR*C(1)-Q1*C(1)+r1*V)/V; %dSI/dt=0
dCdt(2) = (Qi*Ci(2)+QR*C(2)-Q1*C(2)+r2*V)/V; %dSS/dt=0
dCdt(3) = (Qi*Ci(3)-V*C(3)/SRT+r3*V)/V; %dXI/dt=0op(3)
dCdt(4) = (Qi*Ci(4)-V*C(4)/SRT+r4*V)/V; %dXS/dt=0
dCdt(5) = (Qi*Ci(5)-V*C(5)/SRT+r5*V)/V; %dXBH/dt=0
dCdt(6) = (Qi*Ci(6)-V*C(6)/SRT+r6*V)/V; %dXBA/dt=0
dCdt(7) = (Qi*Ci(7)-V*C(7)/SRT+r7*V)/V; %dXP/dt=0
dCdt(8) = (Qi*Ci(8)+QR*SO-Q1*SO+r8*V+KLa*V*(SOsat-SO))/V; %dSO/dt=0
dCdt(9) = (Qi*Ci(9)+QR*C(9)-Q1*C(9)+r9*V)/V; %dSNO/dt=0
dCdt(10) = (Qi*Ci(10)+QR*C(10)-Q1*C(10)+r10*V)/V; %dSNH/dt=0
dCdt(11) = (Qi*Ci(11)+QR*C(11)-Q1*C(11)+r11*V)/V; %dSND/dt=0
dCdt(12) = (Qi*Ci(12)-V*C(12)/SRT+r12*V)/V; %dXND/dt=0
dCdt(13) = (Qi*Ci(13)+QR*C(13)-Q1*C(13)+r13*V)/V; %dSALK/dt=0
end
end
end

```

A16.2. Programa ASM1_ptar.m

```

function [t,Ct,rate] = ASM1_ptar(Ci,c0,op,parm)
tspan = [0,op(10)];
h=0.001; ti=tspan(1);tf=tspan(2); t=(ti:h:tf)'; n = length(t);
N=op(5); ne=N*13; %N=#CSTRs, ne=#EDOs
C0=zeros(1,ne); C0(1:13)=c0;
for r=1:N-1
    C0((13*r+1):13*(r+1))=c0;
end
C0(8+13*(N-1))=op(8);
Ct = ones(n,1)*C0; %Matriz de variables en tspan
c=zeros(13,N); %Matriz de variables en tiempo t
for u = 1:n-1 %Implementando método de Euler
    c(:,1)=Ct(u,1:13)';
    for p=1:N-1
        c(:,p+1)=Ct(u,(13*p+1):13*(p+1))';
    end
    [g,rate]=EDO(c,op,parm);
end

```

```

    for q=1:ne
        Ct(u + 1,q) = Ct(u,q) + g(q)*(t(u + 1)-t(u));
    end
end
function [f,rate]=EDO(C,op,parm) %Modelo ASM1

%Parámetros de Operación y Diseño
%=====
Qi=op(1)*3.6*24; QR=op(2)*3.6*24; %m3/d
Q=ones(N,1); Q(1)=Qi+QR;
for j=2:N
    Q(j)=Q(j-1);
end

N=op(5); Nanox=op(6); ne=N*13; Vt=op(3); Vo=Vt/N; V=Vo*ones(N,1); SRT=op(4);
SOsat= op(7); SO=ones(1,N); KLa=SO;
for i=1:N
    if i<=Nanox
        SO(i)=op(11); KLa(i)=C(8,i);
    elseif i==N
        SO(i)=C(8,i); KLa(i)=op(9);
    else
        SO(i)=op(8); KLa(i)=C(8,i);
    end
end
end

%Parámetros estequiométricos y cinéticos
%=====
YH=parm(1); YA=parm(2); fp=parm(3); iXB=parm(4); iXP=parm(5);
uH=parm(6); KS=parm(7); KOH=parm(8); KNO=parm(9); bH=parm(10);
uA=parm(11); KNH=parm(12); KOA=parm(13); bA=parm(14); ng=parm(15);
ka=parm(16); kh=parm(17); KX=parm(18);nh=parm(19);

%Tasas de procesos (pj)
%=====
p1=zeros(1,N)'; p2=p1; p3=p1; p4=p1; p5=p1; p6=p1; p7=p1; p8=p1;
for i=1:N
    p1(i) = uH*(C(2,i)/(KS+C(2,i)))*(SO(i)/(KOH+SO(i)))*C(5,i);
    p2(i) =
    uH*(C(2,i)/(KS+C(2,i)))*(KOH/(KOH+SO(i)))*(C(9,i)/(KNO+C(9,i)))*ng*C(5,i);
    p3(i) = uA*(C(10,i)/(KNH+C(10,i)))*(SO(i)/(KOA+SO(i)))*C(6,i);
    p4(i) = bH*C(5,i);
    p5(i) = bA*C(6,i);
    p6(i) = ka*C(11,i)*C(5,i);
    p7(i) =
    kh*((C(4,i)/C(5,i))/(KX+C(4,i)/C(5,i)))*((SO(i)/(KOH+SO(i)))+nh*(KOH/(KOH+SO(i)))
    )*(C(9,i)/(KNO+C(9,i))))*C(5,i);
    p8(i) = p7(i)*C(12,i)/C(4,i);
end

%Tasas de conversión (ri)
%=====
r1=zeros(1,N)'; r2=r1; r3=r1; r4=r1; r5=r1; r6=r1; r7=r1; r8=r1; r9=r1; r10=r1;
r11=r1; r12=r1; r13=r1; r0H=r1; r0A=r1; rdesN=r1; rate=zeros(3,N);
for j=1:N

```

```

r1(j) = 0; %rSI
r2(j) = (-1/YH)*p1(j)+(-1/YH)*p2(j)+p7(j); %rSS
r3(j) = 0; %rXI
r4(j) = (1-fp)*p4(j)+(1-fp)*p5(j)-p7(j); %rXS
r5(j) = p1(j)+p2(j)-p4(j); %rXBH
r6(j) = p3(j)-p5(j); %rXBA
r7(j) = fp*p4(j)+fp*p5(j); %rXP
r8(j) = -((1-YH)/YH)*p1(j)-((4.57-YA)/YA)*p3(j); %rSO
r9(j) = -((1-YH)/(2.86*YH))*p2(j)+(1/YA)*p3(j); %rSNO
r10(j) = -iXB*p1(j)-iXB*p2(j)-(iXB+1/YA)*p3(j)+p6(j); %rSNH
r11(j) = -p6(j)+p8(j); %rSND
r12(j) = (iXB-fp*iXP)*p4(j)+(iXB-fp*iXP)*p5(j)-p8(j); %rXND
r13(j) = (-iXB/14)*p1(j)+((1-YH)/(14*2.86*YH)-iXB/14)*p2(j)-
(iXB/14+1/(7*YA))*p3(j)+(1/14)*p6(j); %rSALK
rOH(j)=-((1-YH)/YH)*p1(j);
rOA(j)=-((4.57-YA)/YA)*p3(j);
rdesN(j)=-((1-YH)/(2.86*YH))*p2(j);
end
rate(1,:)=rOH; rate(2,:)=rOA; rate(3,:)=rdesN;

%Balances de masa por componente
%=====
dCdt=zeros(13,N); %Matriz de EDOs (dCi,k/dt)
Xtot=zeros(1,N)'; MXtot=0;
for k=1:N
Xtot(k)=C(3,k)+C(4,k)+C(5,k)+C(6,k)+C(7,k); MXtot=MXtot+V(k)*Xtot(k);
end
%Reactor k=1
dCdt(1,1) = (Qi*Ci(1)+QR*C(1,N)-Q(1)*C(1,1)+r1(1)*V(1))/V(1); %dSI1/dt
dCdt(2,1) = (Qi*Ci(2)+QR*C(2,N)-Q(1)*C(2,1)+r2(1)*V(1))/V(1); %dSS1/dt
dCdt(3,1) = (Qi*Ci(3)+(Q(N)*C(3,N)-(MXtot/SRT)*(C(3,N)/Xtot(N))) ...
-Q(1)*C(3,1)+r3(1)*V(1))/V(1); %dXI1/dt
dCdt(4,1) = (Qi*Ci(4)+(Q(N)*C(4,N)-(MXtot/SRT)*(C(4,N)/Xtot(N))) ...
-Q(1)*C(4,1)+r4(1)*V(1))/V(1); %dXS1/dt
dCdt(5,1) = (Qi*Ci(5)+(Q(N)*C(5,N)-(MXtot/SRT)*(C(5,N)/Xtot(N))) ...
-Q(1)*C(5,1)+r5(1)*V(1))/V(1); %dXBH1/dt
dCdt(6,1) = (Qi*Ci(6)+(Q(N)*C(6,N)-(MXtot/SRT)*(C(6,N)/Xtot(N))) ...
-Q(1)*C(6,1)+r6(1)*V(1))/V(1); %dXBA1/dt
dCdt(7,1) = (Qi*Ci(7)+(Q(N)*C(7,N)-(MXtot/SRT)*(C(7,N)/Xtot(N))) ...
-Q(1)*C(7,1)+r7(1)*V(1))/V(1); %dXP1/dt
dCdt(8,1) = (Qi*Ci(8)+QR*S0(N)-Q(1)*S0(1)+r8(1)*V(1)+KLa(1)*V(1) ...
*(S0sat-S0(1)))/V(1); %dS01/dt
dCdt(9,1) = (Qi*Ci(9)+QR*C(9,N)-Q(1)*C(9,1)+r9(1)*V(1))/V(1); %dSNO1/dt
dCdt(10,1) = (Qi*Ci(10)+QR*C(10,N)-Q(1)*C(10,1)+r10(1)*V(1))/V(1); %dSNH1/dt
dCdt(11,1) = (Qi*Ci(11)+QR*C(11,N)-Q(1)*C(11,1)+r11(1)*V(1))/V(1); %dSND1/dt
dCdt(12,1) = (Qi*Ci(12)+(Q(N)*C(12,N)-(MXtot/SRT)*(C(12,N)/Xtot(N))) ...
-Q(1)*C(12,1)+r12(1)*V(1))/V(1); %dXND1/dt
dCdt(13,1) = (Qi*Ci(13)+QR*C(13,N)-Q(1)*C(13,1)+r13(1)*V(1))/V(1); %dSALK1/dt

%Reactor k=2 hasta N
for i=2:N
dCdt(1,i) = (Q(i-1)*C(1,i-1)-Q(i)*C(1,i)+r1(i)*V(i))/V(i); %dSIk/dt
dCdt(2,i) = (Q(i-1)*C(2,i-1)-Q(i)*C(2,i)+r2(i)*V(i))/V(i); %dSSk/dt
dCdt(3,i) = (Q(i-1)*C(3,i-1)-Q(i)*C(3,i)+r3(i)*V(i))/V(i); %dXIk/dt
dCdt(4,i) = (Q(i-1)*C(4,i-1)-Q(i)*C(4,i)+r4(i)*V(i))/V(i); %dXSk/dt

```

```

dCdt(5,i) = (Q(i-1)*C(5,i-1)-Q(i)*C(5,i)+r5(i)*V(i))/V(i); %dXBHk/dt
dCdt(6,i) = (Q(i-1)*C(6,i-1)-Q(i)*C(6,i)+r6(i)*V(i))/V(i); %dXBAk/dt
dCdt(7,i) = (Q(i-1)*C(7,i-1)-Q(i)*C(7,i)+r7(i)*V(i))/V(i); %dXPK/dt
dCdt(8,i) = (Q(i-1)*S0(i-1)-Q(i)*S0(i)+r8(i)*V(i)+KLa(i)*V(i) ...
*(S0sat-S0(i)))/V(i); %dSNOk/dt
dCdt(9,i) = (Q(i-1)*C(9,i-1)-Q(i)*C(9,i)+r9(i)*V(i))/V(i); %dSNOk/dt
dCdt(10,i) = (Q(i-1)*C(10,i-1)-Q(i)*C(10,i)+r10(i)*V(i))/V(i); %dSNHk/dt
dCdt(11,i) = (Q(i-1)*C(11,i-1)-Q(i)*C(11,i)+r11(i)*V(i))/V(i); %dSNDk/dt
dCdt(12,i) = (Q(i-1)*C(12,i-1)-Q(i)*C(12,i)+r12(i)*V(i))/V(i); %dXNDk/dt
dCdt(13,i) = (Q(i-1)*C(13,i-1)-Q(i)*C(13,i)+r13(i)*V(i))/V(i); %dSALKk/dt
end

f=ones(1,ne)'; f(1:13)=dCdt(:,1)';
for j=1:(N-1)
    f((13*j+1):13*(j+1))=dCdt(:,j+1)';
end

end
end

```

A16.3. Programa ASM1_solver.m

```

tic; %Iniciar cronómetro

%Fraccionamiento del afluente (Caracterización)
%=====
DQ0ta=238.20; DB05a=100.09; SSta=84.55; SSVa=67.13; Nta=46.81; %g/m^3
SI=37.95; SS=81.16; XI=21.44; XS=97.66; XBH=0; XBA=0; XP=0; %gDQ0/m^3
So=0.03; %-gDQ0/m^3
SNO=11.221; SNH=24.343; SND=2.705; XND=7.255; %gN/m^3
SALK=8; %molHCO3/m^3

%Valores de variables y parámetros medidos de la planta
%=====
%Variables compuestas efluente
DQ0te=94.00; DB05e=8.68; %gDQ0/m^3
SSte=13.85; SSVe=10.23; %gSS/m^3
NH3e=14.30; NO3e=13.64; %gN/m^3
ODe=5.15; % gO2/m^3
%Coeficientes estequiométricos del efluente
icv=1.7741; fbod=0.5597; ivt=0.794;
%Parámetros de operación PTAR
FM=0.66; %d^-1, Relación alimento-microorganismos
SSLM=300.06; %g/m^3, Sólidos suspendidos en el licor mezclado
Mlodos=417.237; %kg/d, Producción de lodos

%Valores iniciales para las variables ASM1 del CSTR simple
%=====
SI0=40; SS0=3; XI0=200; XS0=30; XBH0=150; XBA0=90; XP0=1; %gDQ0/m3
KLa0=50; %-gDQ0/m3
SNO0=0.4; SNH0=0.9; SND0=2.5; XND0=2.7; %gN/m3
SALK0=8; %molHCO3/m3

```

```

%Parámetros de Operación y Diseño
%=====
Qi=68.12; Qr=3.14; Qw=0.97; Qe=67.15; Qn=71.26; %L/s, Caudales del afluente,
%recirculación, purga de lodos, efluente y licor mezclado del reactor N
Vtot=1920; %m^3, Volumen total de los N reactores
SRT=1.16; %d, Tiempo de retención de sólidos
HRT=7.48; %hrs, Tiempo de retención hidráulico
N=6; % N° reactores totales,
Nanox=0; % N° reactores anoxios
SOsat=8.637; % gO2/m^3, Concentración de saturación de OD
SOax=0.009; % gO2/m^3, OD fijo en reactores anoxios
SO=2.0; % gO2/m^3, OD fijo en reactores aerobios (menos para el reactor N)
KLa=100; %d^-1, Coeficiente de transferencia de O2
rem=0.95652; %(QN*SST_N-Qe*SST_e)/(QN*SST_N), Eficiencia de clarificador
tsim=100; %d, Tiempo de simulación

```

```

%Parámetros estequiométricos

```

```

%=====
YH = 0.52; % (gDQO formado)/(gDQO oxidado)
YA = 0.20; % (gDQO formado)/(gN oxidado)
fp = 0.08; % adimensional
iXB = 0.086; % gN/gDQO en biomasa
iXP = 0.06; % gN/gDQO en productos particulados

```

```

%Parámetros cinéticos

```

```

%=====
uH = 3.30; % d^(-1)
KS = 66.0; % gDQO/m^3
KOH = 0.20; % gO2/m^3
KNO = 0.50; % gNO3-N/m^3
bH = 0.44; % d^(-1)
uA = 1.35; % d^(-1)
KNH = 1.00; % gNH3-N/m^3
KOA = 0.50; % gO2/m^3
bA = 0.062; % d^(-1)
ng = 0.90; % adimensional
ka = 0.04; % m3/(gDQO*d)
kh = 1.80; % g lentamente biodegradable DQO/(gDQO*d)
KX = 0.03; % g lentamente biodegradable DQO/gDQO
nh = 0.40; % adimensional

```

```

op = [Qi,Qr,Vtot,SRT,N,Nanox,SOsat,SO,KLa,tsim,SOax];
Ci = [SI,SS,XI,XS,XBH,XBA,XP,So,SNO,SNH,SND,XND,SALK];
c0 = [SI0,SS0,XI0,XS0,XBH0,XBA0,XP0,KLa0,SNO0,SNH0,SND0,XND0,SALK0];
parm = [YH,YA,fp,iXB,iXP,uH,KS,KOH,KNO,bH,uA,KNH,KOA,bA,ng,ka,kh,KX,nh];
ef_varm = [DQ0te,DBO5e,SSTe,SSVe,NH3e,NO3e,ODe,FM,SSLM,Mlodos];

```

```

[C0,fc0] = ASM1_cstr(Ci,c0,op,parm); %Simulación del CSTR simple
[t,Ct,rate] = ASM1_ptar(Ci,C0,op,parm); %Simulación de la PTAR
C0(8)=op(8);

```

```

%RESULTADOS

```

```

%=====
%Variables ASM1 en los N reactores
%=====

```

```

ptar=zeros(18,N+3); tn=size(Ct,1);
ptar(1:13,1)=Ci; ptar(1:13,2)=C0; req=zeros(5,N+3);
for i=1:N
    req(1,i+2)=sum(Ct(tn,(13*i-11):(13*i-6))); %g/m3, Xtotal
    req(2,i+2)=-rate(1,i); %g/(m3*d), Requerimiento Het. O2
    req(3,i+2)=-rate(2,i); %g/(m3*d), Requerimiento Aut. O2
    req(4,i+2)=req(2,i+2)+req(3,i+2); %g/(m3*d), Requerimiento Total O2
    req(5,i+2)=-rate(3,i); %g/(m3*d), Velocidad de desnitrificación
end
for i=1:N
    ptar(1:13,i+2)=Ct(tn,(13*i-12):13*i);
    ptar(14:18,i+2)=req(:,i+2);
    if i<=Nanox
        ptar(8,i+2)=op(11);
    elseif i==N
        else
        ptar(8,i+2)=op(8);
    end
end
end

%Variables ASM1 en el efluente
%=====
ef_asm1=ptar(1:13,N+2);
for j=1:13
    if j>=3 && j<=7
        ef_asm1(j)=(1-rem)*ef_asm1(j)*Qn/Qe;
    elseif j==12
        ef_asm1(j)=(1-rem)*ef_asm1(j)*Qn/Qe;
    else
    end
end
end
req(1,N+3)=sum(ef_asm1(2:7)); %g/d, Xtotal en efluente
ptar(1:13,N+3)=ef_asm1; ptar(14,N+3)=req(1,N+3);

%Variables compuestas en el efluente
%=====
DQOt=0; DBOu=0; DQOpart=0; NTK=0;
for k=1:7; DQOt=DQOt+ef_asm1(k);
end
for i=1:3; NTK=NTK+ef_asm1(i+9);
end
for j=1:5; DQOpart=DQOpart+ef_asm1(j+2);
end
for k=1:4
    if k==1
        DBOu=DBOu+ef_asm1(k+1);
    else
        DBOu=DBOu+ef_asm1(k+2);
    end
end
end
DBO5=fbod*DBOu; Nt=NTK+ef_asm1(9); SSV=DQOpart/icv; SST=SSV/ivt;
OD=ef_asm1(8); FM=(Ci(1,2))*fbod/((HRT/24)*sum(req(1,3:(N+2)))/(N*icv));
SSLM=ptar(14,N+2)/(icv*ivt); Plodos=((Vtot/N)*sum(req(1,3:(N+2)))/SRT-(1-rem)*req(1,N+3)*Qn*3.6*24)/1000;

```

```

ef_varc=[DQOt,DB05,SST,SSV,ef_asm1(10),ef_asm1(9),OD,FM,SSLM,Plodos];

%Tabla de variables ASM1 en los N reactores
%=====
rowNames_a =
{'Afluente','CSTR','Reactor_1','Reactor_2','Reactor_3','Reactor_4','Reactor_5','
Reactor_6','Efluente'};
colNames_a =
{'SI','SS','XI','XS','XBH','XBA','XP','SO','SNO','SNH','SND','XND','SALK','Xtota
l','Req_O2Het','Req_O2Aut','Req_O2tot','rDesN'};
VariablesASM1_Reactores=array2table(ptar,'RowNames',colNames_a,'VariableNames',r
owNames_a);

%Tabla de desviaciones de variables compuestas del efluente
%=====
desv=ones(10,4); desv(:,1)=ef_varc; desv(:,2)=ef_varm;
desv(:,3)=ef_varc-ef_varm;
desv(:,4)=(ef_varc-ef_varm)*100./ef_varm;

rowNames_b = {'Calculado','Medido','Residual','PorcDeDesv'};
colNames_b = {'DQOte','DB05e','SSTe','SSVe','N-NH3e','NNO3e','ODe','FM_d-
1','SSLM','PLodos_kg/d'};
VariablesComp_Efluente=array2table(desv,'RowNames',colNames_b,'VariableNames',ro
wNames_b);

%Tabla de porcentajes de remoción de carga de C y N
%=====
remoc=ones(5,3); remoc(:,1)=[DQOta,DB05a,SSTa,SSVa,Nta];
remoc(:,2)=[ef_varc(1:4),Nt]; remoc(:,3)=(remoc(:,1)-
remoc(:,2))*100./remoc(:,1);
rowNames_c = {'Afluente','Efluente','Porc_Remocion'};
colNames_c = {'DQOt','DB05','SST','SSV','Ntot'};
Porcentaje_Remocion=array2table(remoc,'RowNames',colNames_c,'VariableNames',rowN
ames_c);

%GRÁFICAS
%=====
R=1:N;
figure
subplot (2,3,1); plot(t,Ct(:,13*N-12),t,Ct(:,13*N-11),t,Ct(:,13*N-
4),t,Ct(:,13*N-3),t,Ct(:,13*N-2),t,Ct(:,13*N));
xlabel('dias'); ylabel('Concentración g/m3');
legend('SI','SS','SNO','SNH','SND','SALK');
title('Componentes solubles en el último reactor');
subplot (2,3,2); plot(t,Ct(:,13*N-10),t,Ct(:,13*N-8),t,Ct(:,13*N-6));
xlabel('dias'); ylabel('Concentración g/m3'); legend('XI','XBH','XP');
title('Componentes particulados en el último reactor')
subplot (2,3,3); plot(t,Ct(:,13*N-9),t,Ct(:,13*N-7),t,Ct(:,13*N-1));
xlabel('dias'); ylabel('Concentración g/m3');legend('XS','XBA','XND');
title('Componentes particulados en el último reactor')
subplot(2,3,4); plot(R,ptar(1,3:N+2),'-o',R,ptar(4,3:N+2),'-
s',R,ptar(5,3:N+2),'-d',R,ptar(6,3:N+2),'-^',R,ptar(9,3:N+2),'-p');
xlabel('Reactor N°'); ylabel('Concentración g/m3');
legend('SI','XS','XBH','XBA','SNO');
title('Perfil de concentraciones I');

```



```
subplot(2,3,5); plot(R,ptar(2,3:N+2), '-o',R,ptar(10,3:N+2), '-  
s',R,ptar(11,3:N+2), '-d',R,ptar(12,3:N+2), '-^',R,ptar(13,3:N+2), '-p');  
xlabel('Reactor N°'); ylabel('Concentración g/m3');  
legend('SS', 'SNH', 'SND', 'XND', 'SALK');  
title('Perfil de concentraciones II');  
subplot(2,3,6); plot(R,ptar(3,3:N+2), '-o',R,ptar(7,3:N+2), '-s');  
xlabel('Reactor N°'); ylabel('Concentración g/m3');  
legend('XI', 'XP');  
title('Perfil de concentraciones III');  
toc %Finalizar cronómetro
```