

HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL DISEÑO Y MODELACIÓN DE SISTEMAS DE Lodos Activados para la Remoción de Nutrientes

John Alexander Henao Arias¹. Jairo Alberto Romero Rojas²

RESUMEN

El presente artículo describe el desarrollo de una herramienta computacional para la modelación y diseño de distintas configuraciones de sistemas de lodos activados para la remoción de nutrientes (nitrógeno y fosforo) en aguas residuales domésticas. Esta herramienta consta de varios módulos mediante los cuales el usuario incluirá la información de las características de las aguas residuales a ser tratadas y la configuración que permita adelantar la modelación de cada uno de los sistemas incluidos, para obtener los resultados de cada sistema de forma gráfica y numérica con su dimensionamiento geométrico. Esta herramienta permite modelar y diseñar cuatro tipos de configuración de sistema de lodos activados para la remoción de carbono, nitrógeno, fósforo, o su combinación, incluyendo el proceso de sedimentación; proporcionando análisis del diseño más conveniente.

Palabras clave: Aguas residuales, tratamiento de aguas residuales, lodos activados, remoción de nutrientes, modelación.

COMPUTER TOOL FOR THE DESIGN AND MODELING OF ACTIVATED SLUDGE SYSTEMS FOR NUTRIENT REMOVAL

ABSTRACT

This article describes the development of a computational tool for the modeling and design of different configurations of activated sludge systems for the removal of nutrients (nitrogen and phosphorus) in domestic wastewater. This tool consists of several modules through which the user will include the information on the characteristics of the wastewater to be treated and the configuration that allows to advance the modeling of each of the systems included, to obtain the results of each system graphically and numerical with its geometric dimensioning. This tool allows modeling and designing four types of activated sludge system configuration for the removal of carbon, nitrogen, phosphorus, or their combination, including the sedimentation process; providing more convenient design analysis.

Keywords: Wastewater, wastewater treatment, activated sludge, nutrient removal, modeling

¹ Ingeniero Ambiental, Universidad Central, Especialista en Saneamiento Ambiental, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Magister en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. email: john.henao-h@mail.escuelaing.edu.co/jhenaoarias@yahoo.com.ar.

² Ingeniero Civil de la Universidad Nacional, Maestría en Ingeniería Ambiental of Rensselaer Polytechnic Institute Troy New York, Especialista en Aguas Subterráneas de la Universidad Hebrea de Jerusalén, Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los sistemas de tratamiento biológico más usados en el mundo para el tratamiento de aguas residuales, por su nivel de desarrollo, eficiencia y rendimiento es el de lodos activados. La configuración básica de este sistema incluye: un reactor biológico, donde se mantiene en suspensión un cultivo microbiano; un sistema de aireación que suministra el oxígeno requerido por las bacterias presentes en el reactor y un tanque de sedimentación donde se separa el lodo biológico del agua. Dicho sistema ha experimentado notables variaciones a lo largo de los años, a fin de adaptarlo a distintos requerimientos de tratamiento, incluyendo el objetivo de la eliminación de nutrientes (Knobelsdorf Miranda, 2005).

En la actualidad la disponibilidad de recursos tecnológicos como los computadores, representa una de las mejores alternativas para realizar cálculos y estimaciones en tiempos muy cortos, (Chapra & Canale, 1988). Lo anterior, proporciona la motivación para crear herramientas que permitan al Ingeniero de diseño de sistemas de tratamiento de agua ahorrar en tiempos de cálculo. Por lo anterior, este documento presenta el desarrollo de una herramienta computacional que permita diseñar diferentes configuraciones de sistemas de lodos activados para la remoción de nitrógeno y fósforo de una forma cuantitativa y rápida, que permita al usuario obtener comparaciones cuantificables entre las distintas opciones evaluadas, facilitando la selección de la alternativa más eficiente.

2. MATERIALES Y METODO

Se concibe el desarrollo de la herramienta computacional mediante una serie de pasos ordenados y lógicos que permitan estructurar el ciclo de vida del programa informático. En la figura 1 se presenta de forma resumida la

metodología usada para el desarrollo de la herramienta.

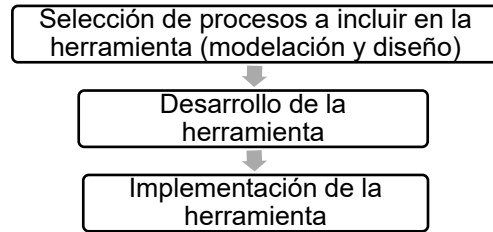


Figura 1. Metodología para el desarrollo de la herramienta.

2.1 Procesos modelados.

2.1.1 Proceso de lodos activados para la remoción biológica de nitrógeno.

El nitrógeno existe en los sistemas acuáticos marinos y de agua dulce en los estados de oxidación de -3 a $+5$ (Figura 2). Existen cuatro formas estables de nitrógeno inorgánico: amonio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-) y $\text{N}_2(\text{g})$. Las tres primeras formas son altamente solubles, la cuarta forma es gaseosa, que es la forma más abundante de nitrógeno en la tierra. Aunque N_2 puede fijarse biológicamente al amoníaco, la tasa de fijación es lenta, debido a este retraso se considera relativamente inerte en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

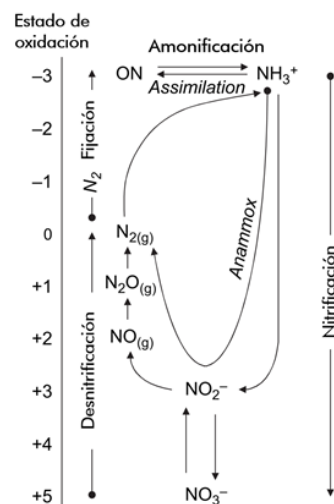


Figura 2. Versión simplificada del ciclo del nitrógeno en el sistema acuático.

Todos los procesos de eliminación biológica de nitrógeno incluyen una zona aeróbica para la nitrificación biológica: $\text{NH}_4\text{-N}$ a $\text{NO}_2\text{-N}$ y a $\text{NO}_3\text{-N}$ y un volumen o tiempo anóxico para proporcionar desnitrificación biológica y lograr la conversión a nitrógeno gaseoso.

Producto del análisis de criterio múltiple (ADCM) se obtuvo que el proceso más recomendado para su implementación en la herramienta es el sistema Ludzak Ettinger Modificado (MLE), el cual presenta mayores ventajas técnicas y económicas para su implementación. Este proceso consta de un tanque anóxico previo al tanque aeróbico donde ocurre la nitrificación. El nitrato producido en el tanque aeróbico regresa al tanque anóxico, donde se encuentran los compuestos carbonosos presentes en el efluente que servirán como donantes de electrones para la reducción de nitrato (Figura 3).

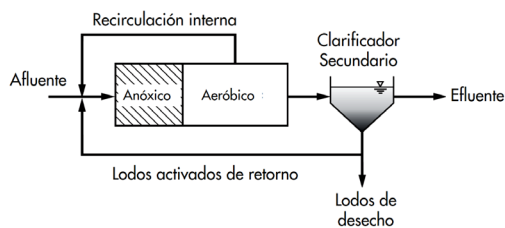


Figura 3 Configuración de un sistema MLE

2.1.2 Principios de la remoción biológica de fósforo.

En el medio ambiente, el fósforo se une en partículas o se presenta como fósforo inorgánico y orgánico disuelto (DIP y DOP). El fósforo inorgánico existe en varias formas de ortofosfato (H_3PO_4 , H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} y PO_4^{3-}) (Sawyer, McCarty, & Parkin, 1994). La abundancia relativa de estas especies varía con el pH en los sistemas acuáticos, aunque el estado de oxidación del fósforo en todos estos ácidos fosfóricos es +5.

Proceso de eliminación biológica mejorada de fósforo (EBPR por sus siglas en inglés): La eliminación biológica mejorada de fósforo (EBPR por sus siglas en inglés) se basa en la selección y proliferación de una población microbiana especializada capaz de almacenar ortofosfato en exceso de sus necesidades de crecimiento biológico. Estos organismos, denominados colectivamente organismos de acumulación de fosfato (PAOs), pueden secuestrar hasta 0,38 mg de P/mg VSS. Como resultado, el licor mezclado de un sistema EBPR puede contener 0,06 a 0,15 mg de P/mg de SSV (Henze, van Loosdrecht, Ekama, & Brdjanovic, 2008).

Producto del análisis ADCM se obtuvo que el proceso para remoción de fósforo más recomendado para su implementación en la herramienta es la configuración A/O, la cual presenta mayores ventajas técnicas y económicas para su implementación. En esta configuración el afluente pasa primero por una etapa anaeróbica, donde las bacterias acumuladoras de fósforo liberan el fósforo almacenado en forma de fosfatos solubles. El fósforo liberado y el fósforo soluble del afluente son absorbidos por las bacterias acumuladoras de fósforo en la etapa aeróbica; finalmente, el fósforo se elimina en el lodo purgado de los sedimentadores secundarios (Figura 4).

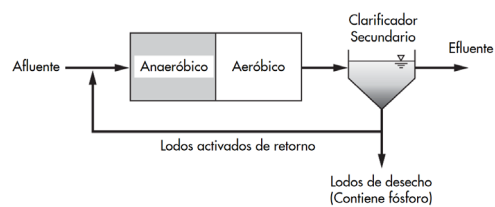


Figura 4 Configuración de un sistema A/O

La herramienta también incluye un sistema para remoción combinada de nitrógeno y fósforo, conocido como sistema biológico para remoción de fósforo y nitrógeno. En este caso, en el análisis ADCM se obtuvo que el proceso

para remoción de nutrientes más recomendado para su implementación en la herramienta es el sistema de la Universidad de Ciudad del Cabo - UTC.

En este sistema el efluente primario fluye directamente a la zona anaeróbica, que también puede recibir lodo primario fermentado para los PAO's. El licor mixto nitrificado se devuelve a la zona anóxica para maximizar la eliminación de nitrógeno mediante la desnitrificación. En consecuencia, el efluente desnitrificado del extremo de la zona anóxica se recicla de nuevo a la zona anaeróbica para proporcionar, en forma continua los microorganismos necesarios para la eliminación del fósforo (Figura 5).

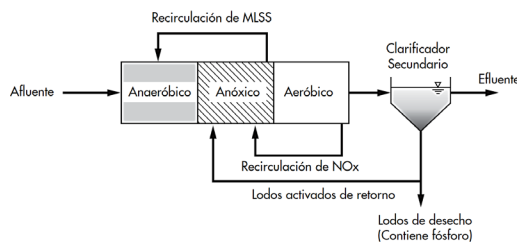


Figura 5 Configuración de un sistema UTC

3. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA.

El desarrollo computacional se realiza con la aplicación Microsoft Excel®, teniendo en cuenta las consideraciones de Walter Mora F et al (2005) que menciona que la hoja electrónica Microsoft Excel® es ampliamente conocida, por profesionales y estudiantes, y cuenta con un gran potencial y adaptabilidad a los diferentes campos del conocimiento.

Para la implementación del modelo, en estado estable, de los procesos de lodos activados, se usa la formulación realizada por (Henze, van Loosdrecht, Ekama, & Brdjanovic, 2008) en el libro Biological Wastewater Treatment Principles, Modelling and Design, incluida en la Tabla 1; la cual permite la estimación de la eliminación de materia orgánica y de nutrientes.

El modelo implementado incluye los diferentes procesos biológicos llevados a cabo por los diferentes grupos de microorganismos: heterótrofos, autótrofos y acumuladores de fósforo, en cada uno de los procesos (Figuras 6 a 9).

Tabla 1. Parámetros de los modelos

Símbolo	Descripción	Unidades
a	Relación de recirculación del licor mezclado (Qa/Qi)	
DBO _e	DBO en el efluente	g/m ³
D _p	Potencial de desnitrificación	g/m ³
DQO _e	DQO efluente	g/m ³
f _{AN}	Fracción de masa anaerobia	g/g
F _{O₂,OHO}	Masa diaria de oxígeno consumido por OHOs.	kg
F _{O₂,PAO}	Masa diaria de oxígeno consumido por PAOs.	kg
FO _c	Oxígeno recuperado a través de la desnitrificación	kg
FO _d	Oxígeno recuperado a través de la desnitrificación	Kg
FO _N	Oxígeno recuperado a través de la desnitrificación	Kg
FS _{NO₃,AX}	Carga de nitrato al reactor	kg
F _{xm}	Fracción máxima de la masa de lodos no aireada	
M _{XE,OHO}	Masa de residuo endógeno OHO en el sistema.	kg
M _{XE,PAO}	Masa de residuo endógeno PAO en el sistema	Kg
M _{XSSF}	Masa de sólidos suspendidos fijos en el sistema	kg
M _{XSSV}	Masa de sólidos suspendidos volátiles en el sistema	kg
MX _i	Masa de SST en el reactor	kg
MX _v	Masa de sólidos suspendidos volátiles (SSV) en el reactor	kg
N _{ne}	Concentración de Nitratos en el efluente	g/m ³
N _{Te}	Nitrógeno total efluente	g/m ³
N _{ti}	Concentración de NTK en el afluente	g/m ³
r	Relación de recirculación de licor mezclado del reactor anóxico al anaerobio basado en el caudal afluente.	
s	Relación de recirculación de lodos (Qs/Qi)	
S _{NO₃,s}	Concentración de nitrato en la recirculación de lodo al reactor anaerobio	gNO ₃ -N/m ³
SST _e	SST en el efluente	g/m ³
TRH _a	Tiempo de retención hidráulico real	hr
TRH _{n,AO}	Tiempo de retención hidráulica nominal de la zona aerobia	hr
TRH _{n,AX}	Tiempo de retención hidráulica nominal de la zona anóxica	hr
TRH _{n,AN}	Tiempo de retención hidráulica nominal de la zona anaerobio	hr
TRS	Edad de lodos	d
V _p	Volumen del reactor	m ³
V _{F,AN}	Volumen zona anaerobia del reactor	m ³
V _{F,AO}	Volumen aerobio	m ³
V _{F,AX}	Volumen anóxico	m ³

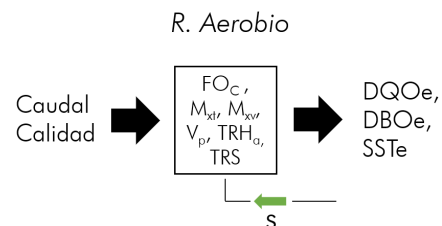


Figura 6 Esquema del modelo de lodos activados convencional para la remoción de materia orgánica.

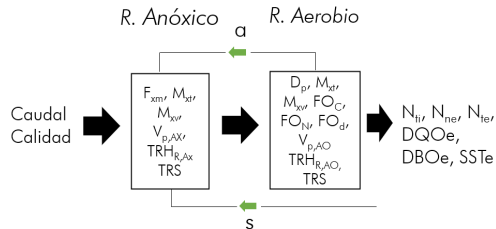


Figura 7 Esquema del proceso MLE para la remoción de Nitrógeno.

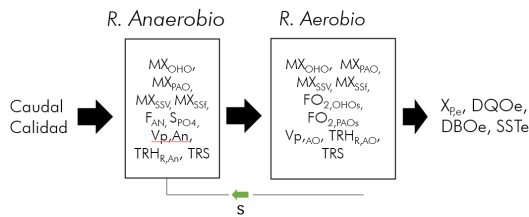


Figura 8 Esquema del proceso A/O para la remoción de Fósforo.

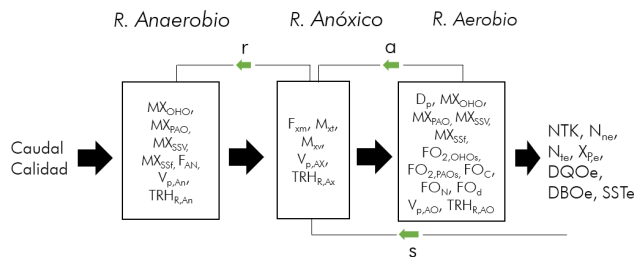


Figura 9 Esquema del proceso UTC para la remoción de Nitrógeno y Fósforo.

3.1 Módulos de la herramienta.

La herramienta integra una serie de módulos con distintas funcionalidades que se muestran a continuación.

3.1.1 Módulo 1. Configuración y selección del sistema a modelar

Este módulo permite al usuario realizar la configuración inicial de la herramienta, incluir las características del agua a tratar, y los parámetros cinéticos y de diseño para cada uno de los sistemas que serán usados en la modelación. Incluye una serie de submódulos (Figura 10) en los cuales el usuario de la herramienta suministra la información requerida para la configuración de la misma tal y como se menciona a continuación.

- ✓ **Submódulo 1. Características de las aguas residuales:** se incluyen las características del afluente al sistema.
- ✓ **Submódulo 2. Constantes cinéticas para cada sistema:** contiene las constantes cinéticas (rendimientos y tasas) de cada uno de los sistemas a modelar.
- ✓ **Submódulo 3: Parámetros del sistema:** el usuario selecciona la configuración requerida para la modelación y diseño tanto de los reactores como de la sedimentación.
- ✓ **Submódulo 4 - Configuración del sistema:** define si el sistema a modelar cuenta con tratamiento primario. Las remociones asociadas al tratamiento primario se definen a partir de las recomendaciones del Manual of Practice No. 8 del 2010.
- ✓ **Submódulo 5 - Selección del sistema a modelar y a diseñar:** el usuario podrá elegir el sistema que quiere modelar y diseñar, puede modelar un único sistema, una combinación de ellos, o todos los sistemas simultáneamente.

3.1.2 Módulo 2. Criterios de diseño

Incluye los criterios usados en el diseño de sistemas de lodos activados, de la Water Environment Federation – WEF de los Estados Unidos, de la Comisión Nacional del Agua – CONAGUA de México, del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia y los del libro de Metcalf & Eddy (Figura 11).

3.1.3 Módulo 3. Modelación de reactores

En él se muestran los resultados de la modelación realizada a los sistemas seleccionados por el usuario. Los resultados obtenidos corresponden a: masa de sólidos en el reactor, SSLM, tiempo de retención hidráulico nominal y real y volumen de reactor requerido, de acuerdo con la edad de lodos recomendada por la herramienta. Con base en lo anterior, recomendará las características del reactor:

volumen y SSML. Esta información será usada por la herramienta en el módulo de diseño para el dimensionamiento del sistema. Adicionalmente, como resultado de la modelación se obtienen las gráficas de los sistemas diseñados (Figura 12)

3.1.4 Módulo 4. Modelación Sedimentadores

Para la modelación del sistema de sedimentación se usó la metodología de análisis del punto de estado (SPA por sus siglas en inglés, State Point Analysis), la cual es una herramienta práctica disponible para diseñadores y operadores para examinar el comportamiento del sedimentador final en varios escenarios operativos. Esta metodología hace un análisis del movimiento de sólidos a través de un clarificador (balance de masas) para obtener la superficie del sedimentador requerido para evitar la pérdida de sólidos por el efluente, al evitar que el sedimentador este sobrecargado en la zona de clarificación y en la zona de espesado del lodo (Figura 13. Henze, van Loosdrecht, Ekama, & Brdjanovic, 2008).

3.1.5 Módulo 5. Diseño conceptual de los sistemas

Este muestra los resultados del dimensionamiento realizado por la herramienta para cada uno de los sistemas de lodos activados y de sedimentación para las temperaturas definidas para el sistema ver figura 14 (2 escenarios relacionados con temperatura mínima y 2 relacionados con temperatura máxima).

Para el dimensionamiento de los rectores y sedimentadores la herramienta toma los criterios seleccionados por el usuario a través del módulo 2 para la validación del diseño y los resultados de modelación arrojados por los módulo 3 y 4 para el dimensionamiento del sistema respectivamente, para el caso puntual del dimensionamiento del sistema de sedimentación se tomó como base lo establecido en la guía de diseño alemana ATV DVWK - A131E, el cual parte del área de sedimentación estimada a partir de la modelación realizada.

1. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Temperatura min	T _{min}	°C	14
Temperatura max	T _{max}	°C	23
Cantidad de Energía - Q _{INH}	Q _{INH}	m ³ /d	1.702.080
Cantidad medio afluente - Q _{med}	Q _{med}	m ³ /d	1.382.400
DOO total afluente	S ₀	g/m ³	454
BOD ₅ afluente	S _{0T}	g/m ³	271
SST afluente	S _{0T}	g/m ³	227
NIT ₅ afluente	N ₀	g/m ³	70
P total afluente	P ₀	g/m ³	9
Nitrógeno afluente	SRD ₂₁	g/m ³	0,0
S ₂ deshecho afluente	SO ₂	g/m ³	0,0
Fración no bio y particulada de la DGO	f _{np}		0,2
Fración orgánica no biodegradable y soluble de N	f _{nos}		0,1
Fración de DGOCh	f _{bc}		0,3
Relación NIT/DOO	f _{ns}		0,12
Relación P/DOO	f _{ps}		0,01
Factor de Seguridad	SF		1,30
pH		Und	8
Alcalinidad HCO ₃	Alk	g/m ³	206
SST afluente	S _{0T}	g/m ³	48
SS Fijos (orgánicos) Afluente	X _{5SF}	g/m ³	49
SST en el efluente	S _{5Tef}	g/m ³	5

2. REMOCIÓN BIOLÓGICA DE CARBONO - BRC

Diagrama de flujo: Afluente → Reactor Aerobio → Tanque de sedimentación secundario → Efluente. Incluye recirculación de lodo.

3. Parámetros del sistema

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Yieldo de lodos activados	Y _A	g/g	1,0
Yieldo de lodos secundarios	Y _S	g/g	0,8
Yieldo de lodos terciarios	Y _T	g/g	0,45
Tasa de respiración endógena (1/d, d+1)	b _A	1/d	1,029
Tasa de respiración endógena (1/d, d+1)	b _S	1/d	0,24
Coefficiente de saturación media (mgN ₄ -N/l)	K ₀		1,123
Tasa específica máxima de crecimiento 1/d, d+1	μ _{max}	1/d	1,123
Tasa de desnaturalización K1	k1	1/d	0,72
Tasa de desnaturalización K2	k2	1/d	0,101
Tasa de desnaturalización K3	k3	1/d	0,072
Tasa de desnaturalización K4	k4	1/d	0,048
DOO /SSV (mgDOO /gSSV)	f _{ov}		1,48
Control de nitrógeno de los SSV	f _n		0,1
Fración de residuo endógeno (t)	f _b		0,2
Fración de Nitrógeno	f _N		0,75
Fración orgánica no biodegradable y soluble de N	f _{nos}		0,04

4. Características de ingreso al sistema con tratamiento primario

Parámetro	Unidad	Valor
DOO	%	40%
BOD	%	40%
SST	%	40%
NIT	%	15%
P	%	10%

5. Selección de sistema a modelar y a diseñar

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Temperatura Mínima	T _{min}	°C	14,0
Temperatura Máxima	T _{max}	°C	23,0

CALCULAR

1. Sub módulo 1: Características de las aguas residuales
2. Sub módulo 2: Constantes cinéticas para cada sistema.
3. Sub módulo 3: Parámetros del sistema.
4. Sub módulo 4: Selección del sistema a modelar y a diseñar.
5. Sub módulo 5- Selección del sistema a modelar y a diseñar

Figura 10. Módulo 1. Configuración y selección del sistema a modelar

Criterios de diseño lodos Activados Convencionales

Criterio	1. MOP 8		2. Metcalf & Eddy		3. RAS 2017		4. CONAGUA	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
SRT (d)	5	15	3	15	3	15	5	15
MSS (kg/m ³)	1.5	3	1	3	1	3	1.5	3
TRH (h)	4	8	4	8	4	8	4	8
Ca/G	0.25	0.7						

Criterios de diseño MLE

Criterio	4. CONAGUA	
	Min	Max
SRT (d)	6	10
MSS (kg/m ³)	1.5	3.5
TRH (h) - Zona Anóxica	3	4
TRH (h) - Zona Aerobia	4	10
Ca/G	0.25	1
Ca/G	1	4

Criterios de diseño A/O

Criterio	2. Metcalf & Eddy	
	Min	Max
SRT (d)	2	5
MSS (kg/m ³)	3	4
TRH (h) - Zona Anóxica	3	1.5
TRH (h) - Zona Aerobia	1	3
Ca/G	0.25	1

Criterios de diseño UIC

Criterio	2. Metcalf & Eddy	
	Min	Max
SRT (d)	10	25
MSS (kg/m ³)	3	4
TRH (h) - Zona Anóxica	1	2
TRH (h) - Zona Aerobia	2	4
TRH (h) - Zona Aerobia	4	12
Ca/G	0.1	1
Ca/G	2	4

Criterios de diseño Sedimentación Secundaria

Criterio	1. MOP 8		2. Metcalf & Eddy		3. RAS 2017		4. CONAGUA	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Carga Indefinida superficial Qind (m ³ /m ² /d)	10	15	10	22	15	22	15	22
Carga superficial de lodos Qind (kg/m ² /d)	100	150	120	190	90	144		

Bibliografía

- Water Environment Federation (2010). DESIGN OF MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT PLANTS. McGraw-Hill Education, Estados Unidos.
- Metcalf & Eddy / AECOM (2014). WASTEWATER ENGINEERING TREATMENT AND RESOURCE RECOVERY. McGraw-Hill Education, Quinta edición, Estados Unidos.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017). RESOLUCIÓN NUMERO 330/2017. "POR LA CUAL SE ADOPTA EL REGLAMENTO TÉCNICO PARA EL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO - RAS Y SE DEROGAN LAS RESOLUCIONES 1096 DE 2000, 0424 DE 2001, 0648 DE 2003, 1439 DE 2005, 1447 DE 2005 Y 2320 DE 2009". Colombia.
- Comisión Nacional del Agua (2016). MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO DISEÑO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES: PROCESOS DE OXIDACIÓN BIQUÍMICA CON BIOMASA SUSPENDIDA. México DF.
- Van Spriengh-Mancos (2001). DIMENSIONAMIENTO DE LÓDOS ACTIVADOS POR BATELADA UTILIZANDO OS PRINCIPIOS DE LA TEORÍA DEL FLUJO DE SÓLIDOS. Revista.

PORTADA DATOS INICIALES Y CONFIGURACIÓN CRITERIOS DE DISEÑO BCR-LA - MODELO BCR-LA - DPE RESULTADOS LAC 1. BCR-L

Figura 11. Módulo 2. Criterios de diseño

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
SRT	Dp1	Nc	Ns	Naa	Nan	Nta	Nti	Nne min	SRT Rec	Ntot est	Foc	Fon	Fod	Fotid	Fxi	Fxv	Fav	Fat
1	0.00	29.71	30.38	-1.90	27.82	-0.10	60.00	0.00	5	60.00	3.717	0	0	3.717	6.077	4.558	0.72	0.54
2	17.19	33.68	27.86	-3.34	30.34	-1.54	60.00	0.00	5	60.00	4.277	0	0	4.277	5.572	4.179	0.67	0.50
3	19.50	38.30	25.97	-6.08	32.23	-4.28	60.00	0.00	5	60.00	4.696	0	0	4.696	5.195	3.896	0.63	0.47
4	0.00	46.91	24.51	-13.22	33.69	-11.42	60.00	0.00	5	60.00	5.021	0	0	5.021	4.902	3.676	0.59	0.45
5	5.72	113.75	23.34	-78.89	34.86	-77.09	60.00	0.00	5	60.00	5.281	0	0	5.281	4.668	3.501	0.56	0.42
6	0.74	6.68	22.38	29.14	35.82	30.94	60.00	3.34	5	34.28	5.494	4.76	143	5.626	4.476	3.357	0.53	0.40
7	13.211	22.47	21.59	14.14	36.51	15.94	60.00	11.24	5	27.18	5.671	482	482	6.750	4.317	3.238	0.50	0.38
8	25.17	22.23	23.91	10.03	37.22	18.33	60.00	13.50	5	25.46	5.820	1.542	555	7.178	4.152	3.187	0.48	0.36
9	7.82	29.75	20.33	8.10	37.87	9.90	60.00	14.88	5	24.78	5.948	2.121	638	7.430	4.067	3.050	0.46	0.34
10	12.03	31.38	19.84	6.99	38.36	8.79	60.00	15.69	5	24.48	6.059	2.296	674	7.622	3.967	2.975	0.44	0.33
11	9.97	32.54	19.40	6.26	38.80	8.06	60.00	16.27	5	24.33	6.156	2.319	698	7.777	3.880	2.910	0.42	0.32
12	768.14	33.44	19.01	5.75	39.19	7.55	60.00	16.72	5	24.27	6.242	2.383	717	7.907	3.803	2.852	0.40	0.30
13	0.52	34.16	18.67	5.37	39.53	7.17	60.00	17.08	5	24.25	6.318	2.434	733	8.019	3.734	2.801	0.39	0.29
14	134.78	34.76	18.36	5.07	39.84	6.87	60.00	17.38	5	24.25	6.386	2.477	746	8.117	3.673	2.755	0.37	0.28
15	101	35.27	18.09	4.84	40.11	6.64	60.00	17.54	5	24.28	6.447	2.513	757	8.203	3.618	2.713	0.36	0.27

SRT	Volumen total Reactor (m ³)										TRH real (h)						
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0		
1	4.558	6.077	6.077	4.651	3.028	2.431	2.026	0.70	6.50	4.90	3.90	3.20	4.90	3.30	2.50	2.00	1.60
2	1.308	18.05	11.405	7.405	5.527	4.529	3.745	18.03	11.90	8.30	7.40	5.00	8.30	6.00	4.50	3.00	2.00
3	11.688	15.585	10.390	7.792	6.234	5.195	24.90	16.60	12.50	10.00	8.30	6.30	8.30	6.30	5.00	4.00	4.20
4	14.709	19.008	19.008	13.072	9.604	7.843	6.536	31.40	20.00	15.70	12.60	10.60	15.70	10.50	7.90	6.30	5.30
5	17.054	23.520	23.520	15.520	11.600	9.320	7.800	37.90	24.00	18.70	14.90	12.60	18.70	12.50	9.40	7.50	6.20
6	20.144	28.858	28.858	17.906	13.429	10.743	8.953	43.00	28.00	21.50	17.20	14.30	21.50	14.30	10.80	8.60	7.20
7	22.665	33.220	33.220	20.146	15.110	12.088	10.073	48.40	32.20	24.20	19.30	16.10	24.20	16.10	12.10	9.70	8.10
8	25.006	33.620	33.620	22.400	16.740	13.224	11.223	53.70	35.70	26.80	21.00	17.50	26.80	17.50	13.00	10.50	8.90
9	27.452	39.003	39.003	24.602	18.391	14.641	12.201	59.00	39.00	29.30	23.40	19.50	29.30	19.50	14.00	11.00	9.60
10	29.753	39.670	39.670	26.447	19.835	15.868	13.223	63.50	42.90	31.70	25.40	21.20	31.80	21.20	15.90	12.70	10.60
11	32.007	42.676	42.676	28.431	21.238	17.070	14.225	68.30	46.50	34.10	27.30	22.80	34.20	22.80	17.10	13.70	11.40
12	34.223	45.651	45.651	30.200	22.855	18.229	15.200	72.00	49.00	35.90	29.00	24.90	35.90	24.90	18.30	14.60	12.20
13	36.407	48.543	48.543	32.362	24.271	19.417	16.181	77.70	51.80	38.80	31.10	25.90	38.90	25.90	19.40	15.60	13.00
14	38.554	51.419	51.419	34.229	25.709	20.568	17.140	82.30	54.80	41.10	32.90	27.40	41.20	27.40	20.60	16.50	13.70
15	40.669	54.205	54.205	35.177	27.132	21.706	18.069	86.80	57.80	43.40	34.70	28.90	43.40	29.00	21.70	17.40	14.50

Ordn	SRT (d)	Vol Reactor	TRH Real
1	3.0	7.780	5.2
2	2.5	9.336	7.5
3	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0

Figura 12 Módulo 3. Modelación de reactores

EVALUACIÓN PARA TMIN

¿Área calculada por el usuario? No

Parámetro	Símbolo	Unidades	Valor
Área del decantador	A	m ²	

Especificaciones de diseño

Flujo promedio (sin lluvia)	Q	m ³ /h	625
Factor de seguridad	Fs		1.5
Recirculación usuario (s1)	s1		
SSMLV	s1	kg/m ³	3.0
Área Decantador	A	m ²	723
Caudal de Recirculación	Gr	m ³ /h	537.5

Parámetros de sedimentación de lodos asumidos

Índice Volumétrico de Lodos	NVL		190
Velocidad de sedimentación inicial (1)	v0	m/h	7.8
Parámetro de sedimentación obturada (1)	pin	m ³ /kg	0.48

Metodología de cálculo **Dagge/Roper (1985)**

EVALUACIÓN PARA TMAX

Especificaciones de diseño

Flujo promedio (sin lluvia)	Q	m ³ /h	625
Factor de seguridad	Fs		1.5
Recirculación usuario (s3)	s3		
SSMLV	s3	kg/m ³	2.5
Área Decantador	A	m ²	973
Caudal de Recirculación	Gr	m ³ /h	468.75

Parámetros de sedimentación de lodos asumidos

Índice Volumétrico de Lodos	NVL		190
Velocidad de sedimentación inicial (1)	v0	m/h	7.8
Parámetro de sedimentación obturada (1)	pin	m ³ /kg	0.48

Metodología de cálculo **Dagge/Roper (1985)**

El gráfico muestra la carga de sólidos (kg/m²·h) en el eje Y (rango 0-10) frente a la concentración de sólidos (kg/m³) en el eje X (rango 0-14). Se observan tres curvas principales: una curva de flujo de gravedad (G) que comienza en el origen y crece; una línea de operación de tasa de desbordamiento (q₁) que es una línea recta descendente; y una línea de operación de tasa de reboso (q_r) que también es una línea recta descendente pero con una pendiente más pronunciada. El punto de estado (X_p) se indica en la intersección de la curva G y la línea q_r. El punto J_{ap} está marcado en la curva G.

Figura 13 Módulo 4. Modelación de Sedimentación

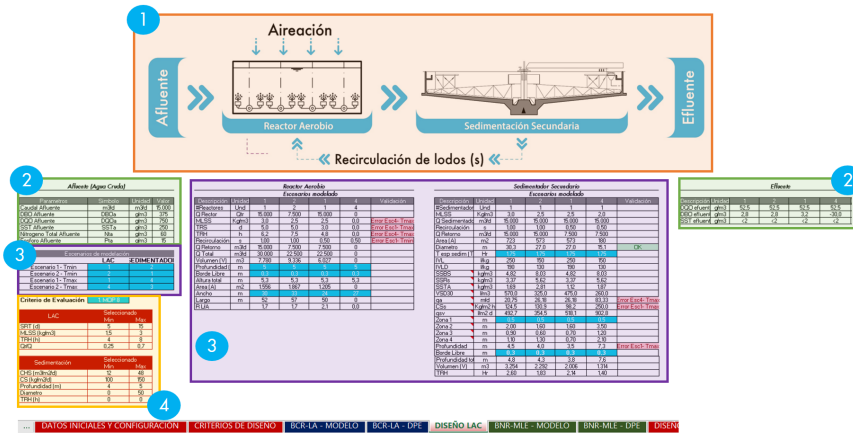


Figura 14. Módulo 5. Diseño conceptual

1. Sub módulo 1: Esquema del sistema modelado
2. Sub módulo 2: Características del afluente y del efluente del sistema.
3. Sub módulo 3: Dimensionamiento de los sistemas.
4. Sub módulo 4: Criterios de evaluación.
5. Sub módulo 5- Selección del sistema a modelar y a diseñar

4. CONCLUSION

Con base en los resultados del ADCM, los sistemas de lodos activados convencionales (LAC), Ludzak-Ettinger Modificado (MLE), Phoredox (A/O), Universidad de Ciudad del Cabo (UTC) se incluyen en la herramienta por presentar las mayores ventajas para la remoción de materia orgánica, nitrógeno, fósforo respectivamente, siendo el sistema UTC el que permite la remoción simultánea de nitrógeno y fósforo.

La herramienta permite al usuario obtener 4 diseños conceptuales de sistemas de lodos activados para remoción de nutrientes, incluyendo los correspondientes sistemas de sedimentación.

Mediante análisis gráfico y numérico de los resultados arrojados por la modelación, se logra seleccionar la alternativa que cumple mejor los objetivos de diseño de la PTAR.

5. BIBLIOGRAFÍA

- AECOM, Metcalf, & I, E. (2014). Wastewater Engineering: Treatment And Resource Recovery. New York: McGraw-Hill.
- Ahn, J. H., Yu, R., & Chandran, K. (2008). Distinctive Microbial Ecology and Biokinetics of Autotrophic Ammonia and Nitrite

Oxidation in a Partial Nitrification Bioreactor. *Biotechnol Bioeng*, 078–1087.

- ATV-DVWK. (Myo de 2000). ATV-DVWK-A 131E Dimensioning of Single-Stage Activated Sludge Plants. DCM, Meckenheim.
- CONAGUA. (2016). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: procesos de oxidación bioquímica con biomasa suspendida. México: CONAGUA.
- González, J. (2017). Herramienta Computacional para el Diseño De Lagunas Naturales de Estabilización. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Henze, M. (2008). Biological Wastewater Treatment, Principles, Modelling and Design. IWA Publishing.
- Minvienda. (8 de Junio de 2017). Resolución 330 de 2017 "Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS y se derogan las resoluciones 1096". Bogotá, Cundinamarca, Colombia.