



Ciencia e Ingeniería
ISSN: 1316-7081
ISSN: 2244-8780
revecien@ula.ve
Universidad de los Andes
Venezuela

Propuesta de tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Yaguachi (Ecuador)

Peña, Sandra; Mayorga, José; Montoya, Rubén

Propuesta de tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Yaguachi (Ecuador)

Ciencia e Ingeniería, vol. 39, núm. 2, 2018

Universidad de los Andes, Venezuela

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507557606007>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Internacional.

Propuesta de tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Yaguachi (Ecuador)

Proposal for the treatment of wastewater from the city of Yaguachi (Ecuador)

Sandra Peña
Universidad de Guayaquil, Ecuador
sandra.penam@ug.edu.ec

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507557606007>

José Mayorga
Universidad de Los Andes, Venezuela
josemayorga51@ula.ve

Rubén Montoya
Universidad de Guayaquil, Venezuela
rmontoya@ula.ve

Recepción: 25 Noviembre 2017
Aprobación: 25 Febrero 2018

RESUMEN:

La contaminación del agua se debe a la adición de microorganismos patógenos, materia orgánica, sólidos, y sustancias tóxicas que perjudican su calidad o que afectan el equilibrio de los ecosistemas. Entre los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales, se destaca el de lagunas de estabilización, por la amplia experiencia del uso de esta tecnología en los países latinoamericanos, además de su sencillez y su bajo costo inicial y de operación, y mínima capacitación del personal encargado de su funcionamiento. En este estudio se dimensiona una planta de tratamiento de aguas residuales para la ciudad de Yaguachi (Ecuador), que incluye 4 lagunas facultativas y 8 lagunas de maduración. La reducción de la carga contaminante es de 82 % para la DBO_{5,20} y 99.99 % para los coliformes. El tamaño total de las lagunas es comparable al de sistemas similares en funcionamiento en varios países de Latinoamérica.

PALABRAS CLAVE: lagunas de estabilización, contaminación del agua, tratamiento del agua.

ABSTRACT:

Water pollution is due to the addition of pathogenic microorganisms, organic matter, solids, and toxic substances that impair their quality or affect the balance of ecosystems. Among the biological processes of wastewater treatment, stands out the stabilization lagoons, for the extensive experience of the use of this technology in Latin American countries, in addition to its simplicity, and low initial and operational cost, and minimum training of the personnel in charge of its operation. In this study, a wastewater treatment plant is sized for the city of Yaguachi (Ecuador), which includes 4 facultative lagoons and 8 maturation lagoons. The reduction of the pollutant load is 82% for BOD_{5,20} and 99.99% for coliforms. The total size of the lagoons is comparable to that of similar systems in operation in several Latin American countries.

KEYWORDS: stabilization lagoons, water pollution, water treatment.

NOTAS DE AUTOR

Peña, Sandra: Ingeniera Química (2000) y Magister en Ingeniería Ambiental (2008). Universidad de Guayaquil. Laboró en Empresas Públicas y Privadas (2001–2009); Consultor y Asesor Técnico Ambiental (2010); Directora de Ingeniería Química de la Universidad de Guayaquil (2015–actual).

Mayorga, José: Ingeniero Químico (1978) y Magister en Ingeniería Química (1986). ULA. Profesor Titular Jubilado Activo de la Escuela de Ingeniería Química de la ULA. Ha trabajado en docencia e investigación en las áreas de Petróleo y Catálisis e Ingeniería Ambiental.

Montoya, Rubén: Profesor Titular Jubilado Activo de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Los Andes. Ha trabajado en docencia e investigación en las áreas de Petróleo y Catálisis e Ingeniería Ambiental.

1 INTRODUCCIÓN

Un agua se considera contaminada cuando se altera su composición, resultando menos apta para una o todas las funciones y propósitos para los que sería apropiada en su estado natural (Hernández 1990). Cualquier comunidad genera residuos sólidos y líquidos. La fracción líquida de los mismos se denomina aguas residuales, e incluye la combinación de los residuos procedentes de instituciones públicas, residencias, establecimientos industriales y eventualmente aguas subterráneas, superficiales y fluviales (Metcalf y col., 1995). Cuando se descargan pequeñas cantidades de aguas residuales en cuerpos de agua de mayor tamaño, los peligros involucrados son menores. En poblaciones grandes, se hace necesario el tratamiento de los vertidos, para que la carga contaminante cumpla con la normativa ambiental del país. El objetivo es proteger la calidad del cauce receptor, lo que se logra con plantas de tratamiento que reducen, entre otros, la demanda bioquímica de oxígeno, DBO, los sólidos totales suspendidos, STS, el nitrógeno y fósforo y los microorganismos patógenos.

En América latina, aproximadamente la mitad de la población tiene servicio de alcantarillado, recolectándose cada día unos 40 millones de m³ de aguas residuales, que luego van a los ríos, lagos y mares (León y col., 1996). De ese volumen, menos del 10% recibe tratamiento previo.

Se estima que en la región hay unas 250 ciudades costeras con más de 100.000 hab. La descarga de aguas residuales sin tratamiento de esos centros poblados contamina las playas de uso recreacional y los productos agrícolas y pesqueros que se cultivan en zonas cercanas, impactando de forma negativa el turismo y la explotación de bienes, e incrementando los riesgos para la salud de los consumidores. Se ha calculado que el 70% de los episodios de diarrea que afectan a los niños se deben a microorganismos patógenos presentes en el agua y a los alimentos contaminados.

En la actualidad, existen diversas opciones para el tratamiento de las aguas residuales, dependiendo del nivel de descontaminación deseado, y de las características del agua a tratar. Por lo general, la mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales, PTAR, utilizan procesos químicos, físicos, y bioquímicos, cuya función es eliminar los diferentes tipos de contaminantes que se encuentran presentes en el agua residual (Cavallini 2011).

El objetivo principal del tratamiento es obtener agua limpia o que pueda ser reutilizada, además de un residuo, conocido también como biosólido, que puede ser empleado en la agricultura o jardinería, por su alto valor nutricional. Las aguas residuales se pueden tratar en el mismo sitio donde se generan, o ser transportadas mediante tuberías a una planta de tratamiento (Cavallini 2011).

Los principales procesos de tratamiento biológico son: lodos activados, biodiscos, filtros biológicos y lagunas de estabilización. Éstas últimas han dado muy buenos resultados en condiciones ambientales apropiadas, como las de las zonas tropicales. Dependiendo de la profundidad, las lagunas se clasifican en aerobias, anaerobias y facultativas.

Los efluentes de las lagunas pueden emplearse en actividades como la horticultura, la acuicultura, la actividad agropecuaria y la forestación. El uso de estas aguas permite también obtener otros beneficios, como el uso eficiente del agua, la provisión de abonos naturales, la generación de empleos e ingresos económicos y la ampliación de la frontera agrícola en zonas desérticas (León y col., 1996). En 1958, se empezaron a usar en América Latina las lagunas de estabilización para el tratamiento de las aguas residuales urbanas, y se ha tenido bastante éxito, estimándose que para finales del siglo 20 había más de 3000 lagunas de estabilización en la región, la mayoría de las cuales continúa trabajando.

Las ventajas más importantes del uso de lagunas incluyen su bajo costo, fácil mantenimiento y operación, es un sistema práctico para poblaciones de hasta 100.000 habitantes, el diseño es muy sencillo, permite variaciones de concentración y flujo, además que mientras más alta es la temperatura del agua residual y el tiempo de retención, mayor es el grado de descomposición de la materia orgánica. Adicionalmente, se tiene mucha experiencia en el proceso, especialmente en América Latina (Cubillos 1994). Entre sus desventajas están que requieren áreas grandes, el efluente tiene alta concentración de sólidos, la falta de

cuidados operacionales puede afectar a la salud pública, una posible contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, la proliferación de insectos y roedores, además de malos olores (Crites y col., 2000). Sin embargo, por los buenos resultados del uso de esa tecnología en América Latina, se propone este método para el tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Yaguachi.

2 PROBLEMÁTICA DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL ÁREA DEL ESTUDIO

Ecuador tiene pocas ciudades que cuentan con sistemas de tratamiento de aguas residuales. Entre ellas, se pueden citar: Jipijapa, Shushufindi, Portoviejo y Cuenca, todas de poca población a excepción de esta última (Barbecho y col., 2008). De los 215 municipios del país, solo el 62% trata el agua residual, mientras que en el resto no se realiza ningún tipo de tratamiento. A nivel regional, la sierra posee el mayor número de plantas de tratamiento (50% del total del país); en la región costera está el 31%; el 18.5% en la región amazónica y el 0,5% restante en la región insular (AME-INEC, 2016).

En el área rural de la provincia de Guayas (una provincia equivale a un estado de Venezuela), las comunidades no poseen sistema de alcantarillado. En el caso específico del Cantón Yaguachi (donde se realiza este estudio) –uno de los 25 de la provincia, con capital Yaguachi nuevo– (un cantón es similar a un municipio de Venezuela), sólo la cabecera cantonal, tiene sistema de tratamiento. En las parroquias rurales, para las aguas residuales generadas en las viviendas, todavía se utilizan los pozos sépticos. En la cabecera cantonal de Yaguachi, las aguas servidas se eliminan a través de un sistema que cubre sólo una parte de la ciudad. El sistema cuenta con lagunas de oxidación para el tratamiento de las aguas servidas, las cuales se ubican junto al río Yaguachi, fuera del perímetro urbano. La PTAR presenta problemas con el mantenimiento de la infraestructura e instalaciones y está prácticamente abandonada. En el caso de la ciudad de Yaguachi, el 54% de las viviendas elimina las aguas a través de pozos sépticos, el 11% en pozos ciegos, el 1% las arroja a ríos o quebradas, el 1% utiliza letrinas y el 9% las elimina de otras formas. Sólo el 24% de las viviendas está conectado a la red de alcantarillado, que va hacia las lagunas de oxidación (AME-INEC 2016).

3 ASPECTOS LEGALES

Ecuador cuenta con una extensa legislación ambiental. Las instituciones públicas encargadas de regular las descargas de aguas residuales incluyen los Departamentos de Gestión Ambiental de las Prefecturas Provinciales y Alcaldías, hasta la máxima autoridad ambiental del país, que es el Ministerio del Ambiente.

Para este estudio, se considera como instrumento legal el T.U.L.S.M.A. (Texto Unificado de Legislación Secundaria Medio Ambiental, Libro VI Anexo 1). En las Tablas 1 y 2 aparecen los límites máximos establecidos en esa legislación para las descargas de aguas residuales (Tulsma 2002).

TABLA 1.

Límites de descargas de AR en cuerpos de agua dulce (Tulsma, 2002).

Parámetro	Límite máximo permitido, mg/L
Aceites y grasas	0,30
Demanda bioquímica de oxígeno, DBO	100
Demanda química de oxígeno, DQO	250
Hidrocarburos totales de petróleo	20
Nitratos + nitritos	10
Organoclorados totales	0,05
Organofosforados totales	0,10
Sólidos sedimentables	1
Sólidos suspendidos totales	100
Sólidos totales, ST	1600

4 POBLACIÓN EN ESTUDIO

De acuerdo al Censo Poblacional del año 2014, el Cantón San Jacinto de Yaguachi (Provincia de Guayas de la República del Ecuador), posee una población de 60.958 habitantes, con el 29,2% en la cabecera cantonal y el 70,8% en las áreas rurales. El cantón se encuentra ubicado en el sureste de Ecuador, a 20 km de la ciudad de Durán. Su territorio es atravesado por el río Yaguachi, formado por la unión de los ríos Milagro y Chimbo. La topografía es plana y ligeramente ondulada, dentro de una llanura aluvial reciente, con una altitud, en su mayor parte, menor a 5 m.s.n.m (aunque en algunos sitios puede llegar hasta los 20 m.s.n.m.) con cotas del orden de 15 m.s.n.m. Los suelos proceden de la degradación de los relieves aluviales, y se caracterizan por ser arcillosos, arcillo-limosos o limo-arenosos. Las pendientes oscilan entre el 2 y 40%, y usualmente se asocian con valles indiferenciados y superficies que forman parte de la llanura aluvial antigua (Clirsén 2011). En la zona predomina el clima tropical, térmico semi-húmedo. Los indicadores meteorológicos varían según la estación del año, con meses fríos y lluviosos de diciembre a mayo (invierno) y meses cálidos, de junio a noviembre (verano). Los índices de humedad y evaporación son elevados. En invierno, se registran temperaturas de 20°C a 28°C, mientras que en verano la temperatura es más alta, (de 26°C a 36°C). La temperatura media anual va de 24,5 a 26°C. La precipitación media anual está entre 750 mm y 1342 mm. El viento sopla generalmente en dirección sur, y presenta pequeñas intensidades durante el mes de abril. La velocidad mínima es de 0,8 m/s y la máxima de 4,7 m/s (Arias, 2014).

4.1 Características de las aguas residuales (AR) de la población en estudio

No se dispone de información de resultados de análisis de las AR de la ciudad de Yaguachi, pero se conocen valores de ensayos realizados a aguas residuales en las ciudades de Guayaquil y Durán en Ecuador y en Bogotá (Colombia). En las Tablas 3 y 4 se muestra una caracterización parcial de las AR de las ciudades de Guayaquil

y Durán (ambas son comunidades cercanas al cantón Yaguachi) y en la Tabla 5, la de Bogotá. Se observa que la DBO y los sólidos son mayores en Durán que en Guayaquil, lo que se puede atribuir al estilo de vida de ambas comunidades.

4.2 Esquema de tratamiento propuesto

Para el tratamiento de las AR en la ciudad de Yaguachi, se recomienda un esquema que incluye cuatro etapas: tratamiento preliminar, sedimentación primaria y laguna(s) facultativas, por ser éstas últimas de operación sencilla y de bajo costo, además que generalmente no producen malos olores (a diferencia de las lagunas anaerobias, que son mucho más profundas y con generación de olores desagradables). Por otra parte, las lagunas aerobias requieren equipos auxiliares para la recirculación del efluente, y elevados costos.

5 DIMENSIONAMIENTO

El tratamiento preliminar incluye la instalación rejas, con el objeto de reducir el contenido de sólidos en suspensión y basura presentes en el agua residual. Las barras que conforman la reja no suelen exceder los 10 mm de ancho por 50 mm de profundidad, y van soldadas a unos elementos de separación, situados en la cara posterior, fuera del recorrido del peine rascador.

TABLA 2.
Límites máximos de sustancias. (Tulsmá, 2002).

Parámetro	Límite máximo permitido	
Clorofenoles	0,5	mg/L
Bifenilos policlorados	0,001	mg/L
Oxígeno disuelto	No menor a 5	mg/ L
Potencial hidrógeno, pH	6,5-9,5	
Sulfuro de hidrógeno	0,0002	mg/L
Amoníaco	0,02	mg/L
Aluminio	1,5	mg/L
Arsénico	0,05	mg/L
Bario	1,0	mg/L
Berilio	1,5	mg/L
Boro	5,0	mg/L
Cadmio	0,005	mg/L
Cianuro libre	0,01	mg/L
Zinc	0,17	mg/L
Cloro residual	0,01	mg/L
Cobalto	0,2	mg/L
Cobre	0,05	mg/L
Cromo total	0,05	mg/L
Fenoles	0,001	mg/L
Grasas y aceites	0,3	mg/L
Hierro	0,3	mg/L
Hidrocarburos totales de petróleo	0,05	mg/L
Hidrocarburos aromáticos policíclicos	0,0003	mg/L
Manganeso	0,1	mg/L
Materia flotante	ausente	
Mercurio	0,0001	mg/L
Níquel	0,1	mg/L
Plaguicidas organoclorados totales	10	mg/L
Plaguicidas organofosforados totales	10	mg/L
Piretroides	0,05	mg/L
Plata	0,005	mg/L
Selenio	0,01	mg/L
Tenso activos	0,5	mg/L
Temperatura	Max 32	C
Coliformes fecales	2000	NMP/100 ml

TABLA 3.
Caracterización de las aguas residuales de Guayaquil (Interagua, 2016).

Fecha muestreo	ST mg/L	SVT mg/L	DBO mg/L	NTK* mg/L
04/01/2016	674	82	139	23
02/06/2016	973	88	138	61,6
05/12/2016	611	78	185	31,7
Promedio	753	83	154	39

TABLA 4.
Caracterización de las aguas residuales de Durán (Interagua, 2016).

Fecha muestreo	ST mg/L	SVT mg/L	DBO mg/L	NTK* mg/L
25/11/2014	1090	800	230	42
27/11/2014	1760	1530	239	40,8
28/11/2014	1580	1370	217	24,7
Promedio	1477	1233	229	36

*NTK= Nitrógeno Total Kjeldahl

TABLA 5.
Características promedio de las aguas residuales de Bogotá. Año 1977 (Romero, 1995)

Parámetro	Magnitud
D.B.O.	190 mg/L
D.Q.O.	382 mg/L
Sólidos Suspendidos totales	403 mg/L
Sólidos Suspendidos Volátiles	129 mg/L
Sólidos Disueltos	243 mg/L
Coliformes, NMP/100 mL	$8,23 \times 10^6$

TABLA 6.
Variables de entrada y salida. PTAR de Yaguachi.

Entrada		Salida
Población, año 2030	45256 hab	
DBO _{5,20} /100 ml	229 ppm	≤100 ppm
NMP, coliformes	8.23*10 ⁶	< 2000
Caudal, Q	8146 m ³ /d	
Temperatura	26°C	

En la parte superior de la reja, se coloca una placa perforada, para que los objetos extraídos se puedan almacenar temporalmente para su drenaje (Metcalf y col., 1995).

El dimensionamiento del resto de equipos para el caso en estudio tiene las variables de entrada y salida que se muestran en la Tabla 6.

En la proyección de la población para el año 2030 (cuando se asume que la PTAR estaría en pleno funcionamiento), se toma en cuenta la población del censo de los años 2010 y 2014 y se asume que el crecimiento poblacional es del 2% anual. Para la DBO del afluente, se utiliza el valor promedio de la ciudad de Durán. El NMP de coliformes corresponde al reportado en Bogotá. El caudal por habitante es un valor usual para este tipo de cálculos y la temperatura corresponde al cantón de Yaguachi.

Para el sedimentador primario, la carga superficial de diseño usual está entre 32 y 48 m³/m² día (Romero 1999). Se selecciona 40 m³/m² día. El tiempo de retención es de 1.5 a 2.5 h y la profundidad es de 3 a 5 m (se escoge 4 m). Así se obtiene un sedimentador de sección circular de 203,7 m² de área y 16,1 m de diámetro.

En el caso de la laguna facultativa, el procedimiento involucra una serie de pasos secuenciales (Montoya 2000), donde se determina la carga orgánica y superficial aplicada, la carga superficial del efluente y el área de la laguna, el período de retención, la DBO soluble del efluente, y el NMP

6 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA PROPUESTA

El costo de un sistema de tratamiento de agua depende, básicamente, de dos factores: la localización y los precios de los insumos requeridos en el momento de su construcción (Romero 1999). La relación entre los costos actuales y pasados se expresa mediante índices. En los Estados Unidos el índice de costos de construcción que más se utiliza es el compilado por Engineering News Record (Engineering Construction News Record, 2018), que asigna un valor de 100 a los costos de 1908; 2576 para 1977; 2776 en 1978; 8802 para 2010 y 11013 en 2018. El costo de construcción a cualquier año se puede calcular por la ecuación (1), (Romero 1999):

$$\text{Costo actual} = \text{Costo año de referencia} \frac{\text{Índice actual}}{\text{Índice año de referencia}} \quad (1)$$

de coliformes del efluente. Debido a que, en este caso, este último valor es mayor al exigido por la norma ambiental ecuatoriana, se requiere dimensionar laguna(s) de maduración, para las cuales, se calcula también el

período de retención y el área. Para la laguna facultativa, se obtiene un área de 4,97 ha. Como este valor es muy grande, se divide el caudal entre 4, y se dimensionan igual número de lagunas primarias del mismo tamaño, en paralelo. Se obtiene un área de 0,76 ha para cada laguna. Con una relación longitud/ancho de 3/1 para cada laguna, las dimensiones son 150 m * 51 m (profundidad= 1,8 m). La $DB_{O_5,20}$ del effluente es 41,35 ppm, valor que es menor que el exigido por las leyes ambientales ecuatorianas (≤ 100 mg/l). Para los coliformes, el NMP del effluente es $1,606 * 10^5/100$ ml. Como se mencionó antes, la norma ecuatoriana establece un máximo de 2000 colonias de coliformes 'por cada 100 mL, por lo que es necesario colocar lagunas de maduración a continuación de las lagunas facultativas. Las variables de entrada y salida de estas lagunas aparecen en la Tabla 7.

TABLA 7.
Variables de entrada y salida. Lagunas de maduración.

Entrada		Salida
$DB_{O_5,20}$ ppm	41.35	
Caudal, m^3/d	1983.3	
Coliformes, NMP/100 ml	$1.606 * 10^5$	< 2000

El procedimiento de cálculo para las lagunas de maduración es idéntico al utilizado para las laguna facultativas, resultando un área de 1,78 ha por cada laguna facultativa. Este valor es muy alto, y se decide colocar 2 lagunas de maduración por cada laguna facultativa primaria, cada una de ellas con un área de 0,89 ha. Si, de nuevo, la relación longitud/ancho de cada laguna es 3/1, sus dimensiones son 163 m * 55 m. La profundidad es 1,2 m. Como el NMP del effluente es menor a 2000, si las AR que salen de la planta van a ser descargadas a un cuerpo de agua, no se requiere la etapa de cloración.

El sistema de lagunas propuesto consta entonces de 4 lagunas facultativas y 8 lagunas de maduración.

Para los costos en el año de referencia, se pueden utilizar diferentes tipos de ecuaciones. Las más útiles y sencillas expresan el costo en función del caudal mediante una ecuación del tipo Costo, $C = K_1 Q^{K_2}$, donde Q es el caudal de diseño (usualmente en m^3/d) y K_1 y K_2 son constantes que dependen del tipo de proceso de tratamiento (Romero 1999). La Tabla 8 contiene una lista parcial de costos de construcción.

TABLA 8.
Costos de construcción de procesos unitarios para PTAR (Romero, 1999)

Proceso de tratamiento	Ecuación
Tratamiento preliminar	$C = 123 Q^{0.76}$
Bombeo del afluente	$C = 730 Q^{0.63}$
Igualamiento de caudales	$C = 482 Q^{0.60}$
Trituradores	$C = 196 Q^{0.56}$
Sedimentación primaria	$C = 375 Q^{0.70}$
Lodos activados	$C = 1076 Q^{0.75}$
Zanjon de oxidación	$C = 4273 Q^{0.57}$
Biodiscos	$C = 1070 Q^{0.77}$
Filtros percoladores	$C = 8271 Q^{0.46}$
Agregación de químicos	$C = 30 Q^{0.91}$
Lagunas de estabilización	$C = 2836 Q^{0.67}$
Lagunas aireadas	$C = 1024 Q^{0.79}$
Microcribado secundario	$C = 1026 Q^{0.58}$
Cloración para desinfección	$C = 299 Q^{0.65}$
Filtración lechos mezclados	$C = 361 Q^{0.79}$
Filtración en arena	$C = 1405 Q^{0.61}$
Edificio de mant.ylaborat.	$C = 1623 Q^{0.58}$

C= costo en dólares,1978; Q= caudal de diseño, m³/d

Utilizando los datos de la Tabla 8, se calcula el costo del tratamiento preliminar, bombeo del afluente, sedimentación primaria, lagunas de estabilización, lagunas de maduración y edificio de mantenimiento y laboratorio, lo que da un costo total de construcción de \$ 5,012,067. Se consideran además otros costos diferentes a los de construcción (planeamiento, administración, legalización, ingeniería básica e imprevistos, en total un 30 % del costo de construcción), por lo que el costo total inicial del proyecto (para 1978) es de \$ 6,515,687. Actualizando el costo al año 2018, se tiene:

Costo total del Proyecto (año 2018) = \$ 25,849,158

Con respecto a los costos anuales de operación y mantenimiento, los valores correspondientes a algunos sistemas de tratamiento, aparecen en la Tabla 9 (Romero 1999). No se reportan datos para lagunas de estabilización, por lo que se emplea la ecuación correspondiente a los lodos activados.

TABLA 9.
Costos totales anuales de operación y mantenimiento de plantas de tratamiento (Romero, 1999)

Tipo de planta	Ecuación de costo
Tratamiento primario	$C = 11.02 Q^{1.01}$
Filtros percoladores	$C = 26.07 Q^{0.94}$
Lodos activados	$C = 30.30 Q^{0.96}$
Tratamiento avanzado	$C = 0.48 Q^{1.44}$

C = costo en dólares,1977; Q = caudal de diseño, m³/d

En este caso, el costo total anual (1977) es de \$ 172.167, que corresponde a \$ 1.156.002 para 2018.

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el dimensionamiento de las lagunas de la PTAR de la ciudad de Yaguachi, para una población de 45256 hab (año 2030) con un caudal de 8146 m³/d de agua residual con las siguientes características: DB_{O5,20} = 230 mg/L, NMP = 8.23 x 10⁶, se obtuvieron los siguientes resultados: 4 lagunas facultativas de 0.76 ha c/u con dimensiones de 150 x 51 x 1,8 m y 8 lagunas de maduración de 0.89 ha c/u con dimensiones de 163 x 55 x 1,2 m. Los parámetros del efluente son: una DBO₅, 20 de 41,35 ppm y NMP de coliformes menor a 2000/100 ml, con % de remoción de 82% para la DBO₅, 20 y 99.99%, para los coliformes.

En la bibliografía consultada existe bastante información sobre el número, tipos de lagunas y características del agua a tratar en plantas en operación en muchos países latinoamericanos pero pocos datos de sus dimensiones. En el caso de lagunas facultativas es más baja la posibilidad de acceder a la información. La Tabla 10 es un resumen de la información obtenida.

La PTAR de Huaral, con una población similar a la de Yaguachi requiere un área total de lagunas facultativas de 3.2 ha vs 3.04 ha calculada en este trabajo. En el caso de la PTAR de San Juan, Lima, el caudal del afluente es aproximadamente el doble que el de Yaguachi, pero el área de las lagunas es mucho más de dos veces la de este estudio.

TABLA 10.
Lagunas de estabilización en América Latina

Sitio	Habitantes	Caudal m ³ /día	Área total, ha	
			Facultativa	Maduración
Huaral, Lima	50.000	-	3,2	-
San Juan, Lima	50.000	21.600	20	-
La Moli- na, Lima	-	1123	3,14	-
Char- queada, Brasil	2500	-	1,9	-
Fort Clayton, Panamá	-	606	0,4	-
Cataca- mas, Honduras	-	2615	3,4	1,2
Santa Fe, Colombia	31690	5387	1,98	-
Yagua- chi, Ecuador	45256	8146	3,04	1,78

Debe mencionarse que en la planta de San Juan, el efluente de las lagunas facultativas va a otras lagunas para piscicultura. Para la PTAR de La Molina, Lima, a pesar de que el caudal alimentado es aproximadamente 1/8 del de Yaguachi, el área de las lagunas es muy parecida. En este caso pareciera haber un sobredimensionamiento, que se podría atribuir a las características de las aguas a tratar o al modelo de diseño utilizado. Caso similar ocurre en la PTAR de La Charqueada, Sao Paulo. En la PTAR de Fort Clayton, Panamá, el caudal es 12 veces menor que en la planta de Yaguachi con un área de lagunas proporcionalmente más pequeña. La PTAR de Catacamas, Honduras, tiene un área total de lagunas de 4.6 ha mientras que la planta de Yaguachi, que está diseñada para un caudal 3 veces mayor necesita 10.16 ha. Con la PTAR de Santa Fe, Antioquia, Colombia, es difícil realizar una comparación válida de las dimensiones de las lagunas, debido principalmente a que utilizan lagunas anaerobias y no facultativas como método de tratamiento biológico.

8. CONCLUSIONES

El río Yaguachi está recibiendo la descarga de AR domésticas de la ciudad de Yaguachi, la mayor parte de ellas sin ningún tratamiento, lo cual produce serios problemas de contaminación en este cuerpo de agua. La planta de tratamiento en operación recibe una fracción muy pequeña de las AR de la ciudad, y está prácticamente abandonada. Se evaluaron distintas opciones de tratamiento biológico para las aguas AR y se seleccionó el método de lagunas de estabilización debido entre otras a las siguientes razones: bajo costo inicial y de operación, simplicidad de construcción, amplia experiencia de esta tecnología en América Latina y por requerir poco personal con mínima capacitación. El sistema propuesto consta de 4 lagunas facultativas de 0.76 ha c/u y 8 lagunas de maduración de 0.89 ha c/u. El área total de las lagunas es comparable con las de PTAR en funcionamiento en Latinoamérica para el mismo propósito. Con el sistema presentado, se lograría una reducción del 82 % en la $DB_{O_5,20}$ y del 99.99 % en el NMP de coliformes. Los costos de construcción y operación (año 2018) son \$ 25, 849, 158 y \$ 1,156,002 respectivamente.

REFERENCIAS

- AME-INEC, 2016, Estadística de información ambiental económica en gobiernos autónomos descentralizados municipales 2015 (agua y alcantarillado). Disponible en http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/webinec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2015.
- Arias D, 2014, Gad municipal de San Jacinto de Yaguachi. Disponible en <http://app.sni.gob.ec>
- Barbecho B, 2008, Estudio de prefactibilidad de tratamiento de aguas residuales, Tesis de maestría, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Cavallini J, 2011, Estudio de opciones de tratamiento y reuso de aguas residuales en Lima metropolitana. Disponible en <http://www.lima-water.de>.
- Clirsen S, 2011, Generación de Geo información para la Gestión del Territorio a Nivel Nacional Disponible en <http://app.sni.gob.ec>
- Crites R, Tchobanoglous G, 2000, Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados, Mc Graw-Hill, Bogotá, Colombia.
- Cubillos A, 1994, Lagunas de estabilización, CIDIAT, Mérida, Venezuela.
- Engineering News Record Construction Cost Index History. Disponible en <https://www.enr.com/economics>
- Hernández D, 1990, Contaminación Ambiental. Causas, efectos y control, Maracaibo, Venezuela.
- Interagua 2016, Tenguel inicia el año con nueva Planta de Potabilización y sistema de aguas servidas. Disponible en <https://www.interagua.com.ec>
- León G, Moscoso J, 1996, Curso de tratamiento y uso de aguas residuales, CEPIS, Lima, Perú.
- Metcalf y Eddy, 1995, Ingeniería de aguas residuales, Mc Graw-Hill, México.

- Montoya R, 2000, Manual sobre tratamiento de aguas, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Oakley S, 2005, Lagunas de estabilización en Honduras, Agencia de los Estados Unidos para el desarrollo internacional, Tegucigalpa, Honduras.
- Romero J, 1995, Acuitratamiento por lagunas de estabilización, Tercer mundo Editores, Bogotá, Colombia.
- Romero J, 1999, Tratamiento de aguas residuales, Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia.
- TULSMA 2002, Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua. Disponible en <https://www.dspace.espol.edu.ec>