



Indicadores de calidad microbiológicos en sistemas de tratamiento de aguas residuales por lodos activados

Microbiological quality indicators in sewage water treatment systems by activated sludge

*Karen Lucia Salcedo Vargas**, *Yessica Sulliet Asprilla Grueso**, *Leonardo Alberto Ríos Osorio†*

RESUMEN

INTRODUCCIÓN: los lodos activados son utilizados comúnmente durante el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales, donde los microorganismos convierten sustancias orgánicas (sustrato) en CO_2 y H_2O a través de la respiración aeróbica. Existen diferentes parámetros físico-químicos que pueden influir en la calidad de los lodos como los sólidos suspendidos (SS), sólidos sedimentables (SSD), oxígeno disuelto (OD), DBO_5 , DQO, pH, nitrógeno amoniacal (N-NH_3), la toxicidad del sistema, entre otros y parámetros biológicos como bacterias, protozoos y metazoos. De este último los protozoos se han utilizado para evaluar el desempeño de los lodos activados, como indicadores de calidad del proceso; sin embargo, aún no existe un consenso entre los investigadores sobre indicadores de calidad, y no existe una homologación conjunta sobre estos sistemas.

OBJETIVO: describir los indicadores de calidad microbiológicos en sistemas de tratamiento de aguas residuales por lodos activados a partir de una revisión sistemática de la literatura científica que sirva como referencia para futuros proyectos encaminados a realizar este tipo de estudios.

MÉTODOS: se realizó una revisión sistemática de la literatura publicada entre los años 2005 y 2015 en las bases de datos: ScienceDirect y Scopus. La búsqueda arrojó un total de 17 artículos originales, filtrados mediante criterios de inclusión y exclusión. Adicionalmente se incluyó literatura complementaria obtenida mediante la herramienta de búsqueda Scholar Google.

RESULTADOS Y CONCLUSIÓN: este estudio reveló que la naturaleza del agua residual es un factor importante que determina las estructuras comunitarias de los indicadores microbiológicos. Además, existen diferentes indicadores de calidad para los diferentes tipos de aguas, industrial, doméstica y mixta que pueden dar respuesta del funcionamiento del sistema.

Palabras clave: aguas residuales, Indicadores, lodos activados, protozoos

* Estudiantes de Microbiología Industrial y Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

† Bacteriólogo y Lab. Clínico. Especialista en CBB, Parasitología Humana. Ph.D. en Sostenibilidad. Grupo de investigación Salud y Sostenibilidad, Escuela de Microbiología, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Contacto: leonardo.rios@udea.edu.co

Recepción: 06/09/2018 Aceptación: 27/05/2019

Cómo citar este artículo: Salcedo-Vargas KL, Asprilla-Grueso YS, Ríos-Osorio L. Indicadores de calidad microbiológicos en sistemas de tratamiento de aguas residuales por lodos activados. Hechos Microbiol. Año;Vol(#):44-55

ABSTRACT

INTRODUCTION: activated sludge processes are commonly used for municipal and industrial wastewater treatment, where microorganisms turn organic substances (substrate) into CO₂ and H₂O through aerobic respiration. There are different physicochemical parameters that can influence the quality of the sludge, such as suspended solids (SS), settling solids (SSD), dissolved oxygen (DO), BOD₅, COD, pH, ammonia nitrogen (N-NH₃) and system toxicity; biological parameters include bacteria, protozoa, and metazoans. Among the latter, protozoa have been used as quality indicators of the process, to evaluate the performance of activated sludge. However, researchers have not yet found a consensus on quality indicators, and there is no approval of these systems.

OBJECTIVE: to describe the microbiological quality indicators in wastewater treatment systems by activated sludge through a systematic review of the scientific literature that may serve as a reference for future studies on the subject.

METHODS: a systematic review of the literature published between 2005 and 2015 was conducted in the ScienceDirect and Scopus databases. The search yielded a total of 17 original articles, filtered by inclusion and exclusion criteria. In addition, complementary literature from Google Scholar was included.

RESULTS AND CONCLUSION: this study revealed wastewater nature as an important factor to determine community structures of microbiological indicators. In addition, there are distinct quality indicators for industrial, domestic and mixed waters which can still describe system performance.

KEY WORDS: wastewater, indicators, activated sludge, protozoa.

INTRODUCCIÓN

El lodo activado es un proceso biológico utilizado comúnmente para el tratamiento de aguas residuales, el cual está basado en el desarrollo de bio-agregados apropiados en un proceso de aireación.¹ A este sistema ingresan diferentes tipos de aguas: domésticas, industriales y comunitarias. De acuerdo a su origen

resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos transportados por el agua proveniente de residencias, oficinas, establecimientos comerciales e instituciones, industrias, así como aguas residuales de actividades agrícolas, aguas superficiales, subterráneas y de precipitación.²

Existen diferentes parámetros físico-químicos que pueden influir en la calidad de los lodos tales como: sólidos suspendidos (SS), sólidos sedimentables (SSD), oxígeno disuelto (DO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), pH, nitrógeno amoniacal (N-NH₃), carbono orgánico total (TOC), tasa de consumo de oxígeno (TCO) y la toxicidad del sistema.³ Otros de los parámetros que influyen en este sistema son los microbiológicos que incluyen bacterias, hongos, protozoos y metazoos. Las bacterias son las principales responsables de la eliminación de la materia orgánica. Sin embargo, los protozoos y metazoos también juegan un papel importante en el mantenimiento de una comunidad bacteriana equilibrada, estos ayudan en la eliminación de patógenos, la reducción de DBO₅ y el proceso de floculación.⁴

En los últimos años se han propuesto modelos basados en las características biológicas para la verificación de las condiciones de funcionamiento y evaluación de los sistemas de lodos activados. Las plantas de tratamiento de lodos activados se clasifican en 3 categorías con base a la densidad total de protozoos presentes en el tanque de aireación, como sistemas ineficientes, poco eficientes y eficientes. Para la determinación de la densidad y el número de unidades taxonómicas presentes en el sistema se utiliza Índice Biótico de Lodos (IBL) el cual está relacionado con las características del sistema, este puede dar evidencia de la calidad e indicar si el lodo es viejo o nuevo.⁴

Se han realizado investigaciones en un intento por elucidar la relación entre las densidades de la población ciliada y la calidad de los efluentes en plantas donde se utiliza lodo activado.^{5,6} Es así como se ha cuantificado la relación de las especies de protozoos presentes en los lodos activados,⁷ así como su relación con los parámetros operativos en el rendimiento de las plantas, convirtiéndose en una referencia válida (un IBL) para estos sistemas.

Los métodos basados en la evaluación de los protozoos como estructura poblacional, se han utilizado

para evaluar el desempeño de plantas tratada con lodos activados y como indicadores de calidad del proceso; sin embargo, no se ha llegado a un consenso sobre el método más indicado para la evaluación de la calidad de los lodos activados en la literatura científica; por esta razón, el objetivo de este estudio fue describir los indicadores de calidad microbiológicos en sistemas de tratamiento de aguas residuales utilizando lodos activados a partir de una revisión sistemática que sirva como referencia para proyectos encaminados a realizar este tipo de estudios.

MATERIALES Y MÉTODOS

ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA

En 2015, se realizó una búsqueda sistemática de literatura en las bases de datos ScienceDirect, Scopus y Scholar Google para dar respuesta a la pregunta de investigación ¿Cuáles son los indicadores de calidad microbiológicos en un tratamiento de aguas residuales por lodos activados? utilizando descriptores DeCS.

Se realizó la búsqueda con la ruta general (“activated sludge” AND (bacteria OR protozoa)), cruzados mediante el operador “AND” con los términos ((indicators OR indexes) AND quality). En las bases de datos, Scopus y Scholar Google se utilizaron los límites de tiempo “2005 to present”, “published 2005 to present” y “2005-2015” respectivamente, para abarcar la literatura científica publicada entre 2005 y 2015. Las rutas específicas de búsqueda utilizadas en las tres bases de datos fueron las siguientes.

Scienccdirect: (“activated sludge” AND (bacteria OR protozoa)) and TITLE-ABSTR-KEY((indicators OR indexes) AND quality)

Scopus: TITLE-ABS-KEY((“activated sludge” AND (bacteria OR protozoa)) AND (indicators OR indexes) AND quality) AND PUBYEAR > 2005 AND (LIMIT-TO(DOCTYPE, “ar”)) AND (LIMIT-TO(LANGUAGE, “English”))

Google Scholar: (“activated sludge” AND (bacteria OR protozoa)) AND ((indicators OR indexes) AND quality) AND (theses OR dissertations)

CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN.

Se incluyeron sólo artículos originales reportados en la literatura científica en los últimos 10 años (2005 a 2015), escritos en el idioma inglés, los cuales reportaron poblaciones microbianas como bioindicadores de la planta de tratamiento de aguas residuales por lodos activados o Identificación y cuantificación de los microorganismos (bacterias y protozoos) presentes en los lodos activados, se tuvieron en cuenta además artículos que hablaran sobre el proceso de sucesión microbiológica como indicador de calidad del proceso por lodos activados.

Se excluyeron los artículos en los que solo se estudiaba el fenómeno de sucesión microbiológica únicamente desde el punto de vista físico-químico o aquellos artículos que solo evaluarán las comunidades microbianas en un solo punto y momento durante el tratamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inicialmente se encontraron 79 artículos relacionados con indicadores de calidad microbiológicos en el proceso de lodos activados, 50 artículos en Scopus y 29 artículos en ScienceDirect, los cuales incluían los términos de búsqueda en el título o en el resumen. Posteriormente, se eliminaron once referencias duplicadas entre las bases de datos, las cuales pasaron por un filtro en los que se tuvieron en cuenta los criterios de inclusión y exclusión; a partir de la revisión, 62 artículos fueron descartados. La implementación del protocolo de búsqueda en las dos bases de datos incluyó un total de 17 artículos. A estos 17 artículos obtenidos se sumaron por exhaustividad 4 artículos originales de revistas no indexadas en las bases de datos con un total de 21 artículos como se muestra en la [Figura 1](#), los cuales cumplen con los criterios de inclusión y exclusión. Esta literatura gris fue obtenida mediante la herramienta de búsqueda Google Scholar.

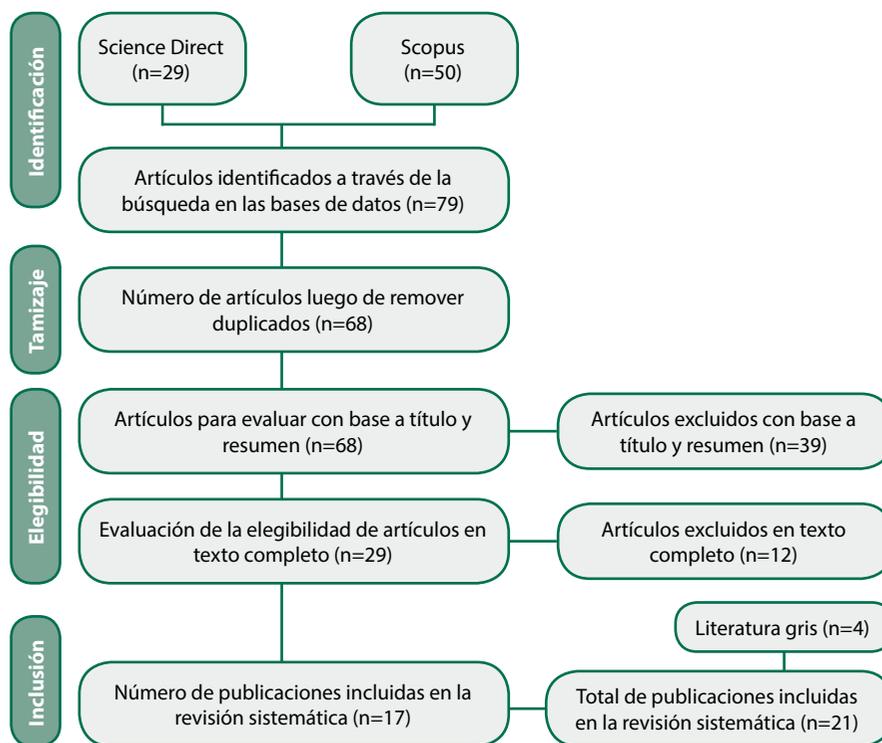


Figura 1. Flujograma de la estrategia de búsqueda bibliográfica

DISTRIBUCIÓN DE LOS ARTÍCULOS CIENTÍFICOS OBTENIDOS EN LA REVISIÓN SISTEMÁTICA, DE ACUERDO CON LA REVISTA CIENTÍFICA, PAÍS Y AÑO DE PUBLICACIÓN.

La búsqueda sistemática de la literatura científica producida entre los años 2005 y 2015 concerniente al tema de investigación, arrojó 21 artículos científicos de estudios realizados en 12 países China, España, Grecia, Irlanda, Reino Unido, Bélgica, Estados Unidos, Suecia, Lituania, Portugal, Egipto y Finlandia. A continuación, se presenta la **Figura 2** con la ubicación de cada país. En esta figura también se observa la falta de estudios realizados en Latinoamérica donde tres

cuartas partes de las aguas residuales vuelven a los ríos y otras fuentes hídricas, creando un serio problema de salud pública y para el medio ambiente. También hay serias implicaciones ecológicas. Latinoamérica es una de las regiones más biodiversas del mundo y comprende nada menos que un tercio de las fuentes de agua del mundo. La contaminación del agua atenta contra ese orden.

Debido a lo complejo del problema, se debe revisar el proceso de producción de agua de una manera integral: suministro, saneamiento y manejo de aguas residuales y drenaje urbano, es decir, invertir en sistemas de tratamiento de aguas residuales.

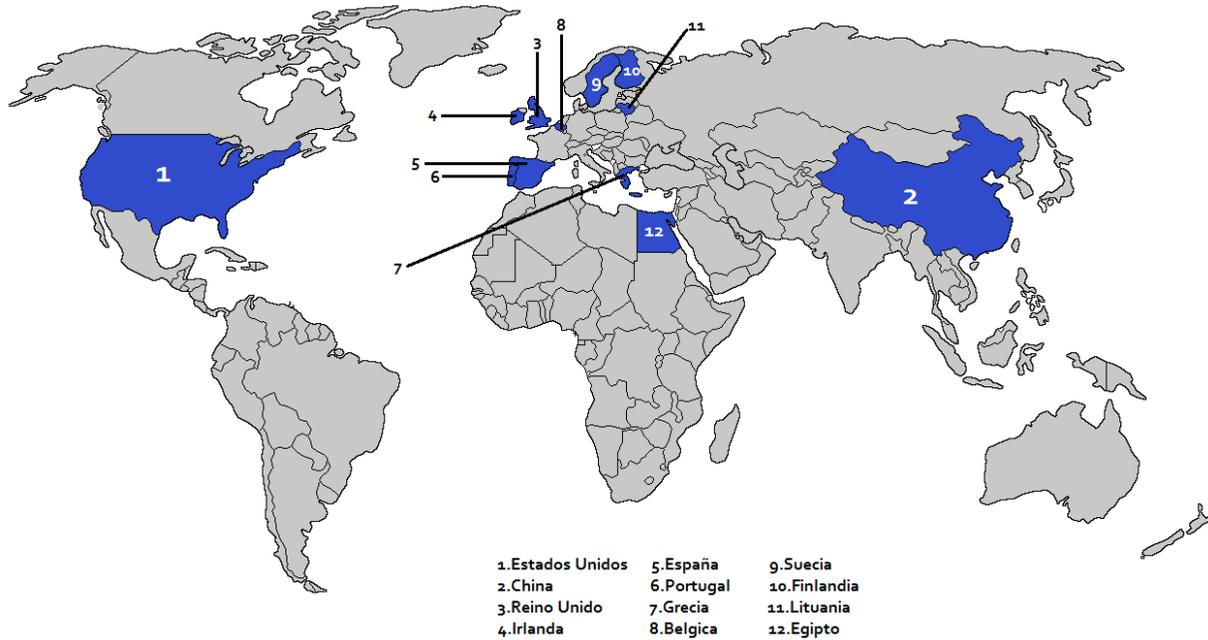


Figura 2. Países en los cuales se realizaron los estudios

Los países en los cuales se evidenció el mayor número de estudios fueron España, Grecia y China; esto pudo deberse a que en la actualidad se sabe que el crecimiento demográfico de las zonas urbanas en estos países y el desarrollo industrial, han tenido graves efectos en la calidad del agua superficial y subterránea. El proceso de alteración y pérdida de la calidad se agudiza a medida que la población deja de depender de sus ríos para el abastecimiento de agua; a la vez, estos

han ido convirtiéndose en depósitos para las aguas residuales de distinto origen.⁸

En los últimos años estos países han tenido graves penalizaciones por la deficiencia de calidad en sus tratamientos y calidad de aguas residuales, de allí pudo partir el interés de conocer e indagar sobre sus procesos para tratar las aguas residuales y así implementar mejoras en sus tratamientos. En la [Figura 3](#), se muestra el número de estudios por país.

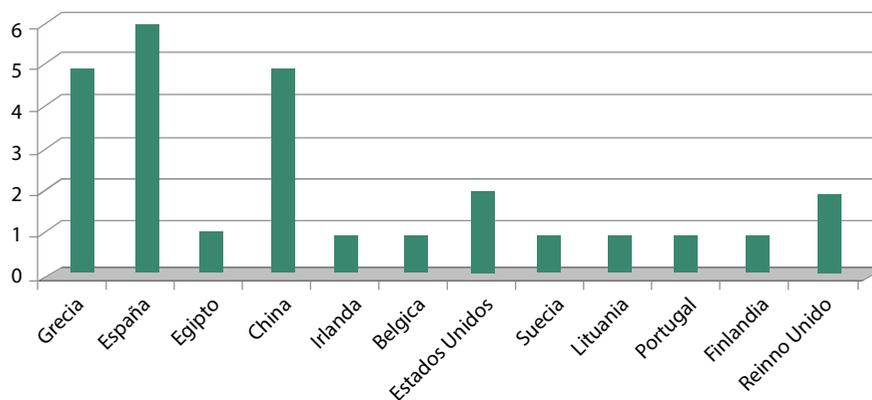


Figura 3. Número de publicaciones por país.

La revisión sistemática también reveló que la información científica obtenida durante la búsqueda se concentró en algunas revistas científicas especializadas en ambiente, aguas, protistología, ecología e ingeniería. Aquellas que reportan más publicaciones son Protistology, International Journal of Development y Ecological Indicators. A continuación, en la **Figura 4** se presentan las revistas científicas en las cuales se

publicaron los artículos incluidos en la revisión sistemática y su frecuencia de publicación.

En cuanto al año de publicación, se encontró que la producción científica de los últimos 10 años no presentó una tendencia de crecimiento claro en el tiempo y que esta alcanzó su máximo nivel en el año 2013. El número de publicaciones por año se muestra en la **Figura 5**.

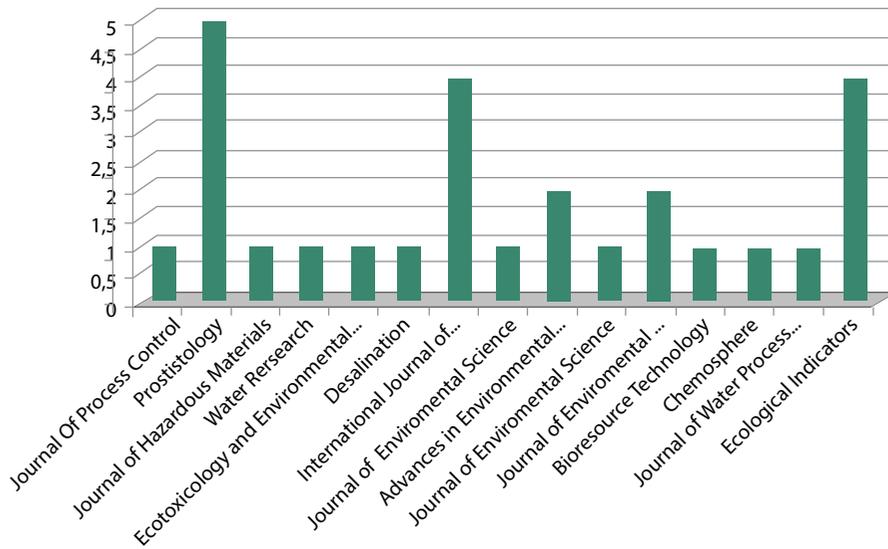


Figura 4. Número de publicaciones por revista

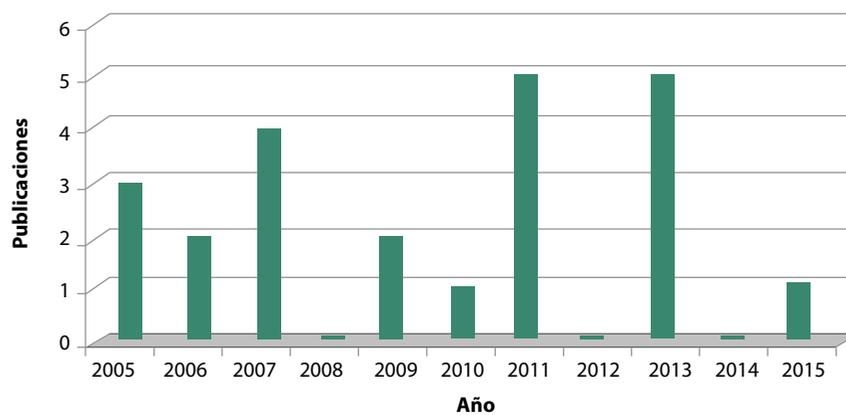


Figura 5. Número de publicaciones por año

LODOS ACTIVADOS EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Los lodos activados son un proceso biológico utilizado comúnmente durante el tratamiento de aguas residuales, donde los microorganismos convierten sustancias orgánicas (sustrato) a CO_2 y H_2O a través de la respiración aeróbica, y se han utilizado como sistemas de tratamiento secundario en las plantas de tratamiento de aguas residuales a nivel municipal e industrial. La eficiencia del proceso depende, entre otros factores, de la capacidad de floculación de la biomasa activa y la composición de los lodos formados.⁹

TIPOS DE AGUAS RESIDUALES QUE INGRESAN A LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO

A los sistemas de tratamiento de aguas residuales por lodos activados llegan diferentes tipos de aguas a tratar, estas se clasifican en función del origen de su contaminación, a saber: i) aguas residuales domésticas, estas están integradas por aguas fecales, aguas de fregado y agua de cocina; los principales contaminantes de ellas son la materia orgánica y microorganismos, y suelen verterse a los ríos o al mar tras una pequeña depuración. Ii) aguas residuales industriales, estas contienen casi todos los tipos de contaminantes (minerales, colorantes, metales, residuos orgánicos, y térmicos por las aguas de refrigeración, entre otros); estas aguas se vierten a ríos y mares tras una depuración parcial.¹⁰ Los tipos de aguas tratadas en los artículos encontrados en la literatura científica fueron de tipo doméstico, industrial, mixto (industrial y doméstico) y sintético (Agua residual doméstica o industrial preparada en el laboratorio) (Tabla 1).

Tabla 1. Tipos de aguas tratadas en los estudios

Tipo de agua	Referencia
Mixta	(Muela <i>et al.</i> , 2011) ¹¹ (Dubber and Gray, 2011) ¹² (Zhou <i>et al.</i> , 2006) ¹³
Sintética	(Papadimitriou <i>et al.</i> , 2007) ¹⁴ (Smets <i>et al.</i> , 2006) ¹⁵ (Lee <i>et al.</i> , 2005) ¹⁶ (Monavari and Guieysse, 2007) ¹⁷
Doméstica	(Papadimitriou <i>et al.</i> , 2013) ¹ (Puigagut <i>et al.</i> , 2007) ¹⁸ (Arévalo <i>et al.</i> , 2009) ¹⁹ (Zhou <i>et al.</i> , 2006) ¹³ (Dubber and Gray, 2011) ¹² (Zhou <i>et al.</i> , 2008) ²⁰ (Koivuranta <i>et al.</i> , 2015) ²¹
Industrial	Dubber and Gray, 2011 ¹²

BIOINDICADORES EN LODOS ACTIVADOS

El sistema de lodos activados consiste en una compleja asociación de microorganismos compuestos por bacterias, protozoos, hongos y microorganismos que oxidan compuestos orgánicos e inorgánicos. La comunidad establecida en ese sistema es dinámica y fundamental para el tratamiento; y cada especie tiene su importancia para el buen funcionamiento del sistema.³ Las bacterias remueven la materia orgánica transformándola en flóculos o grumos microbianos (lodo biológico) que pueden ser fácilmente separados del fluido, por sedimentación, dando como resultado agua tratada clarificada y con bajo contenido de materia orgánica disuelta. Siendo este un proceso biológico, resulta sensible a los factores ambientales que pueden afectar a los microorganismos (temperatura, pH, contenido de materia orgánica, etc.), de ahí que la presencia de determinados microorganismos sea un parámetro que permita inferir el estado operativo.²² Es posible encontrar microorganismos que forman agregados filamentosos, los cuales si se encuentran en un número muy elevado dan origen a problemas de operación, así como de la calidad del agua tratada. Bacterias como *Beggiatoa* spp. y *Thiothrix* spp. se pueden encontrar en sistemas de tratamientos aerobios de aguas residuales.²²

Los bioindicadores son potencialmente importantes para predecir el desempeño de los procesos y la eficiencia de estos. A partir de estos se puede evaluar la calidad de un proceso determinado, en este caso el lodo activado en los tratamientos de aguas residuales. Para la evaluación de los lodos,¹² han propuesto a los protozoos como bioindicadores de calidad; su eficacia en el proceso de purificación es debido al hecho de que se alimentan de bacterias. La diversidad de cilios y abundancia de estos microorganismos dan a conocer el rendimiento de los lodos. Por otra parte, los protozoos son especialmente sensibles a los cambios en las condiciones ambientales, lo que permite la evaluación de cualquiera de las condiciones en el interior del sistema. La estructura de las especies de la población de protozoos, en este sistema, está relacionada con el DBO_5 del efluente final.

La literatura científica ha reportado los siguientes indicadores de calidad en lodos activados, principalmente de protozoos (Tabla 2). A continuación se describen algunas características de los principales protozoos asociados con la calidad de los lodos activados:

Arcella spp. Ameba testácea, se caracteriza por la presencia de testa circular, con opérculo central e invaginado y a veces rodeado de una línea o círculo de poros; la testa quitinosa esta compuesta por subunidades muy pequeñas, es incolora o amarillenta cuando el organismo es joven (cuerpo celular viable) y más oscura cuando el organismo envejece. En general este microorganismo está asociada a buenos rendimientos de depuración, baja carga orgánica, altos tiempos de retención celular, buena oxigenación y condiciones de nitrificación en el reactor cuando se presentan elevadas densidades. Durante el periodo de verano, cuando las temperaturas son altas, se observan mayores desarrollos de este microorganismo.²³ *Arcella* spp. fue hallado en la mayoría de los estudios, y vale la pena anotar que esta frecuencia no obedece a dominancia en el sistema, sino más bien al número de veces que se repite en el tipo de plantas estudiadas; *Arcella* spp. está relacionada con un buen asentamiento de los lodos.^{13, 14}

Aspidisca spp. Hace parte de los protozoos ciliados que se desplazan sobre las superficies y flóculos de los lodos, alimentándose de las bacterias que se encuentran a su paso. Presenta estructuras ciliares llamadas cirros. Es un protozoo ciliado hipótrico que habita reactores biológicos de baja carga, este tiene cuerpo redondeado con costillas en el lado dorsal y cirros en el lado ventral. Son característicos los cirros transversos que emplean para desplazarse.²³ Papadimitriou *et al.*¹⁴ demostraron que este organismo puede ser un buen indicador de calidad en las plantas de tratamiento de aguas residuales, dado que se han correlacionado negativamente con todos los parámetros de efluentes tales como DBO, sólidos suspendidos (SS) y presencia de nitratos en aguas residuales contaminadas con fenol. En general, es característico de condiciones de estabilidad en el sistema de lodos activados y por tanto de buena eficacia en la depuración.

Epistylis spp. Pertenece al Phylum Ciliophora. Tiene 200-250 μm de largo y sus colonias pueden alcanzar hasta 2 mm de largo. Es un Protozoo colonial, fijo a sustratos mediante un pedúnculo no contráctil. Esta especie forma amplias colonias, con células grandes. Son habituales en los sistemas de lodos activos con un buen funcionamiento, *Epistylis* spp. está relacionado de manera negativa con la calidad del efluente.²³

Stylonychia spp. Pertenece al Phylum Ciliophora, es un protista de vida libre provisto de una compleja estructura de cilios que sirven tanto para la locomoción como para la depredación. La particularidad de *Stylonychia* reside en su extraordinaria adaptación a la reptación. Es un gran nadador, pero también es capaz de deslizarse sobre cualquier tipo de superficie. Su cuerpo está aplastado dorso-ventralmente, y posee numerosos cilios agrupados en torno a membranelas junto a la boca citoplasmática, unos cilios que generan pequeños torbellinos con los que atrapan a sus presas. Es un ciliado herbívoro y de aspecto agresivo, muy común en casi todas las aguas en las que hay pequeñas algas.²³

Blepharisma spp. Tiene cuerpo alargado, periforme o elipsoidal, más angosto en la parte anterior, ciliatura distribuida uniformemente. La cavidad bucal presenta una zona adoral de membranelas localizada en el lado izquierdo, la cual en su extremo posterior sufre un giro hacia el lado derecho, conectándose con el citosoma por una membrana paraoral (ondulante) muy predominante, localizada en el lado derecho. El aparato nuclear está conformado por tres a cinco elementos macronucleares y el número de micronúcleos es de ocho a trece; se alimenta de bacterias.²² Es poco frecuente en lodos activados y está asociada a condiciones de mala oxigenación.²³ Entre los artículos que arrojó la búsqueda, este microorganismo mostró ser un buen indicador en sistemas que tratan aguas residuales contaminadas con fenol. *Blepharisma* spp. está relacionado especialmente con buenas condiciones nitrificantes, oxígeno disuelto bajo y con bajas concentraciones de sólidos en el sistema, dando como resultado buenos lodos en términos de sedimentabilidad y efluentes de buena calidad.¹⁴

Trochilia minuta. Cuerpo en forma elipsoidal, se caracteriza por presentar una prominencia en forma de espina en el polo posterior; ciliación somática en el lado ventral, nasa faríngea patente; y dos vacuolas contráctiles, una anterior y otra posterior.²³ Es un indicador de una baja carga másica.²⁴ Según Dubber and Gray,¹² este organismo junto con *Blepharisma* spp. están relacionados con bajas concentraciones de sólidos.

Trithigmotoma cucullulus. Ciliado de vida libre de tamaño 90 x 35 μm , con una nasa prominente recta, la superficie dorsal tiene varias vacuolas contráctiles, macronúcleos ovoides, se mueve lentamente

en el licor mixto o en las superficies. Esta especie tolera una amplia gama de condiciones ambientales.²⁵ Se caracteriza por su estructura en la boca, esta se adapta a la depredación de algas filamentosas. En la literatura científica se encontró que *T. cucullulus* es sensible a amonio y fosfato y podría ser indicador no sólo de alta calidad del efluente, sino también con la nitrificación y la eliminación de fosfato.¹²

Litonotus obtusus. Es un protozoo ciliado de cuerpo casi plano y de contorno de pez alargado. Se desliza en el agua por sus casi imperceptibles cilios y recoge de ella algunos restos orgánicos y pequeñas bacterias. Habita reactores de lodos activados y aguas eutróficas. Es una especie depredadora que se alimenta de pequeños flagelados y ciliados.²³ Está asociado con un alto índice de volumen en los lodos, lo que genera malos olores.¹³ Indica estabilidad ecológica si aparece en densidades bajas. A elevadas densidades poblacionales indica deterioro del sistema; típico de edades de lodos elevadas y bajas cargas, así como de lodos de mala sedimentabilidad.²³

Carchesium spp. Protozoo colonial, que se fija mediante un pedúnculo contráctil. Los mionemas son discontinuos, y cada ramificación con sus individuos se contrae de forma independiente.²³ Se alimenta de bacterias de vida libre que se encuentran tanto sobre la superficie como fuera de las colonias. Su función es esencial en la consecución de aguas claras y bien depuradas.^{16,26} *Carchesium* spp. fue encontrado en lodos activados en un rango de DBO entre 0 y 10 mg/L, lo que indica la buena calidad del efluente en las aguas tratadas con lodos activados.²⁷

Chilodonella spp. Cuerpo celular ventral y ciliación somática localizada principalmente en dicha región ventral; es un microorganismo característico por un “pico” sobresaliente del cuerpo celular (parte anterior-izquierda) y por presentar aspecto de “gorra” sí se encuentra de perfil. Es característica también la forma de “coma” de la nasa faríngea.²³ Hace parte de los protozoos cuya célula presenta cilios, fundamentales en la locomoción y captura de alimentos. Su hábitat fundamental es el agua libre, desplazándose y alimentándose de las bacterias dispersas en el medio. Se desarrolla en medios con cierta carga de materia orgánica.²³ Es indicador de bajo tiempo de retención de lodos. Presente en sistemas no nitrificantes y con abundancia de bacterias filamentosas.¹⁶

Euglypha spp. Presenta testa alargada, ovoide o piriforme, dotada de pequeñas escamas ovoides organizadas en filas. Si presentan espinas, estas son pequeñas y dispersas por la superficie. Pseudópodos tipo filópodo.²³ *Euglypha* está asociado a bajas concentraciones de sólidos en el reactor y a buenas calidades del efluente.²⁰

Opercularia spp. Protozoo ciliado peritríco, colonial, fijo a sustratos mediante un pedúnculo no contráctil. Esta especie se desarrolla en medios con elevada carga de materia orgánica y baja concentración de oxígeno disuelto, así como en presencia de vertidos industriales.²³ Curds & Cockburn²⁸ y Salvado *et al.*,²⁹ encontraron una asociación entre este microorganismo y la mala calidad de los efluentes, dado que indica lodos de crecimiento lento debido a vertidos industriales especiales y difíciles de tratar.²⁰

Tabla 2. Protozoos como indicadores de calidad microbiológicos de los lodos activados

Indicadores de calidad	Tipo de agua residual	Rangos (células/mL)	Referencias
<i>Arcella</i> spp.	Doméstica	0-3500	(Papadimitriou <i>et al.</i> , 2007), (Zhou <i>et al.</i> , 2006), (Lee <i>et al.</i> , 2005), (Dubber and Gray, 2011)
<i>Aspidisca</i> spp.	Doméstica	0-3500	(Papadimitriou <i>et al.</i> , 2007)
<i>Epistylis</i> spp.	Doméstica	0-3500	(Papadimitriou <i>et al.</i> , 2007)
<i>Stylonychia</i> spp.	Doméstica	0-3500	(Papadimitriou <i>et al.</i> , 2007)
<i>Blepharisma</i> spp.	Industrial contaminada con fenol	0-53	(Papadimitriou <i>et al.</i> , 2013)
<i>Trochilia minuta</i>	Industrial	0-12600	(Dubber and Gray, 2011)
<i>Trithigmostoma cucullulus</i>	Industrial	0-400	(Dubber and Gray, 2011)
<i>Carchesium</i> spp.	Industrial Sintética	0-400	(Lee <i>et al.</i> , 2005)
<i>Chilodonella</i> spp.	Industrial	0-400	(Lee <i>et al.</i> , 2005)
<i>Euglypha</i> spp.	Mixta	0-2000	(Zhou <i>et al.</i> , 2008)
<i>Opercularia</i> spp.	Mixta	0-2000	(Zhou <i>et al.</i> , 2008)
<i>Litonotus obtusus</i>	Mixta	0-2000	(Zhou <i>et al.</i> , 2008)

INFLUENCIA DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD Y PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS EN LOS BIOINDICADORES EN TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES CON LODOS ACTIVADOS

Los índices de calidad aún no se han descrito en este tipo de procesos; sin embargo, el IBL puede tener un papel útil en el control y desestabilización de los lodos activados, y también en la identificación de problemas que surgen en el proceso, tales como la oxigenación incorrecta y la presencia de sustancias tóxicas; dado que estos pueden afectar los procesos de sucesión microbológica dentro del tratamiento dando como resultado efluentes de mala calidad. El IBL puede proporcionar una indicación rápida del estado del lodo, el funcionamiento del sistema y todos los cambios que tienen lugar dentro de él. De esta manera, la calidad del agua tratada se puede estimar rápidamente, se puede monitorizar el rendimiento del sistema y, los problemas de funcionamiento, pueden ser detectados antes de que el proceso sea afectado.¹⁹

En la mayoría de los estudios se trató de establecer alguna relación entre los protozoos y los parámetros físico-químicos, los cuales han afirmado al DBO como el único parámetro de la calidad del agua residual que podría estar relacionado con las características microbológicas de los lodos y por ende del efluente tratado.¹¹ Estas relaciones microbológicas asociadas a las físico-químicas pueden dar una clasificación de los lodos, y permiten dividir los lodos activados en cuatro tipos: i) los de mala condición que contienen flagelados, rizópodos y muy pocos ciliados (DBO por encima de 30 mg/L); ii) los de nivel insatisfactorio, donde los lodos tiene más ciliados (DBO 21 hasta 30 mg/L); iii) los que tienen características satisfactorias que incluyen ciliados como *Chilodonella* spp., *Colpoda* spp., *Aspidisca* spp., *Carchesium* spp. y *Vorticella* spp. (DBO 11-20 mg/L); y iv) los lodos que tiene una buena calidad del efluente y que contiene flagelados y amebas, y numerosas ciliados como *Carchesium* spp., *Vorticella* spp. y *Loxophyllum* spp. (cuya DBO osciló entre 0 y 10 mg/L).²⁷ En la Tabla 3 puede observarse la conversión de valores del IBL en cuatro clases de calidad y su respectiva evaluación.²⁷

Tabla 3. Conversión de valores del IBL en cuatro clases de calidad y su evaluación

Valor de IBL	Clase	Evaluación
8 – 10	I	Lodo estable y muy bien colonizado; muy buen funcionamiento.
6 – 7	II	Lodo estable y bien colonizado; actividad biológica en disminución; buen funcionamiento.
4 – 5	III	Depuración Biológica insuficiente en el tanque de aireación; funcionamiento regular.
0 – 3	IV	Depuración Biológica escasa en el tanque de aireación; funcionamiento bajo.

IMPLEMENTACIÓN DE BIOINDICADORES POR LODOS ACTIVADOS EN LOS TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES

La implementación de los bioindicadores debe basarse en la evaluación de protozoos y su asociación con algunos parámetros físico-químicos. Las plantas de tratamiento de aguas residuales con lodos activados producen efluentes de alta calidad, lo que se evidencia con valores de DBO bajos entre 0-15 mg/L y SS bajos, dado que contienen una amplia variedad de ciliados con altas densidades, mientras que para plantas que entregan los efluentes de mala calidad, los valores de DBO están por encima de 30 mg/L; con este resultado se puede demostrar que los efluentes son deficientes en organismos ciliados y sólo unos pocos protozoos en densidades numéricas bajas. En cuanto a bioindicadores para la evaluación de la buena calidad de los lodos activados se proponen *Arcella* spp., *Aspidisca* spp., *Epistylis* spp. y *Stylonychia* spp. para aguas domésticas, y los *T. cucullulus*, *Carchesium* spp., *Chilodonella* spp. para aguas industriales, y por último *Euglypha* spp. para aguas residuales mixtas. Los protozoos mencionados anteriormente son indicadores del buen funcionamiento de los lodos, pero, así como existen indicadores de buena calidad, también se encuentran indicadores que muestran el mal funcionamiento de los lodos, como lo es el caso de la presencia de *Opercularia* spp.

Adicionalmente, existen otros factores que pueden alterar la sensibilidad de los indicadores de calidad en los lodos activados; y uno de los factores que más influye es el tiempo de retención de lodos (TRL).¹⁹ Se ha descrito que cuando el TRL aumenta y la temperatura

es elevada, se produce un lodo activado caracterizado por flóculos pequeños y fragmentados con un alto número de bacterias. La presencia de bacterias filamentosas es considerable, y esto provoca problemas de derrame y ensuciamiento.

CONCLUSIONES

- En la literatura científica revisada en este estudio se reportaron los protozoos como los principales indicadores biológicos de la calidad y funcionamiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales; las bacterias, que también fueron reportadas, no se destacaron de manera importante en los estudios evaluados.
- Este estudio proporciona elementos útiles para la identificación y cuantificación de los protozoos presente en los lodos activados que pueden proporcionar una rápida información sobre las condiciones ambientales y el rendimiento de la planta de tratamiento. Los cambios en la abundancia de especies de bioindicadores pueden ser indicativos de problemas en el funcionamiento de la planta; no obstante, los protozoos varían según el tipo de agua residual a tratar dando lugar a especies diferentes dentro de los bioindicadores.
- La naturaleza del agua residual es un factor importante que determina las estructuras comunitarias de los indicadores microbiológicos.
- Aunque es difícil identificar los protozoos, se recomienda identificar los grupos funcionales para evaluar el rendimiento del sistema de lodos activados.
- Para el caso de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, *Arvella* spp., *Aspidisca* spp., *Epistylis* spp. y *Stylonychia* spp. demostraron ser buenos indicadores de calidad, dado que se correlacionaron negativamente con todos los parámetros de efluentes tales como DBO, sólidos suspendidos (SS), presencia de nitratos en aguas residuales contaminadas con fenol.
- La proliferación de *Trochilia minuta*, *Aspidisca* spp., *Englypha* spp., *Blepharisma* spp. está relacionada, especialmente, con buenas condiciones nitrificantes, oxígeno disuelto bajo y bajas concentraciones de sólidos en el reactor, dando como resultado buenos

lodos, en términos de sedimentabilidad, y efluentes de buena calidad.

- *Aspidisca* spp. está asociado con bajos niveles de oxígeno disuelto y bajas concentraciones de nitrato. Esto sugiere un posible uso como una especie indicadora en los sistemas de desnitrificación.
- No se evidencia una correlación directa entre los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos; sin embargo, este último demostró tener una mayor sensibilidad para detectar los cambios en las condiciones de operación de los tratamientos de aguas residuales, lo que sugiere que los parámetros microbiológicos son esenciales para supervisar el correcto funcionamiento de estos tratamientos.
- El IBL puede tener un papel útil en la evaluación de la estabilización de los lodos activados y también en la identificación de problemas que surgen en el proceso, tales como la oxigenación incorrecta y la presencia de sustancias tóxicas.
- Las revisiones sistemáticas son una buena herramienta para sintetizar hallazgos de la literatura científica que giran en torno a un mismo problema científico, aunque el ejercicio de obtención de la literatura puede tener sesgos relacionados con los periodos de tiempo definidos para la búsqueda y los descriptores definidos para tal fin.

CONFLICTO DE INTERESES

No hay conflicto de intereses.

REFERENCIAS

1. **Papadimitriou CA, Petridis D, Zouboulis A, Samaras P, Yiangou M.** Protozoans as indicators of sequential batch processes for phenol treatment; an autoecological approach. *Ecotoxicol Environ Safety*. 2013;98: 210-218.
2. **Lizarazo JM, Orjuela MI.** Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia. [Monografía Especialización en Administración en Salud Pública]. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Medicina: Bogotá; 2013.
3. **Silva G, Venícus C, Santos J.** Microbiología de sistema de lodos ativados e sua relação com o tratamento de efluentes industriais: a experiência da Cetrel. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*. 2009;14(2):183-92.

4. **Pellizzaro A, Sezerino P, Philippi L, Reginatto V, Lapolli F.** Caracterização da microfauna em estação de tratamento de esgotos do tipo lodos ativados: um instrumento de avaliação e controle do processo. *Eng Sanit Ambient.* 2005;10(4).
5. **Esteban G, Téllez C, Bautista LM.** Dynamics of ciliated protozoa communities in activated sludge process. *Water Res.* 1991;8967-972.
6. **Al-Shahwani, SM, Horan NJ.** The use of protozoa to indicate changes in the performance of activated sludge plants. *Water Res.* 1991;25(6):633-638.
7. **Madoni P.** A sludge biotic index (SBI) for the evaluation of the biological performance of activated sludge plants based on the microfauna analysis. *Water Res.* 1994;28(1):67-75.
8. **Mulero A.** El problema de las aguas residuales en España: Carencias territoriales, gestión reciente y perspectivas. *Ería.* 1999;48:5-17.
9. **Kurumi H, Masami M, Daisuke I, Michihiko I.** Bacterial community dynamics in a full-scale municipal wastewater treatment plant employing conventional activated sludge process. *J of Bios Bioeng.* 2014;118(1):64-71.
10. **Gil MJ, Soto AM, Usma JI, Gutiérrez OD.** Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + Limpia.* 2012;7(2):52-73.
11. **Muela A, Orruño M, Alonso L, Pazos M, Arana I, Alonso RM, et al.** Microbiological parameters as an additional tool to improve wastewater treatment plant monitoring. *Ecological Indicators.* 2011;11:431-437.
12. **Dubber D, Gray NF.** The influence of fundamental design parameters on ciliates community structure in Irish activated sludge systems. *Eur J Protistol.* 2011;47:274-286
13. **Zhou K, Muqi X, Jiayin D., Hong C.** The microfauna communities and operational monitoring of an activated sludge plant in China. *Eur J Protistol.* 2006;42(4):291-295.
14. **Papadimitriou Ch, Palaskab G, Lazaridou M, Samarasc P, Sakellaropoulou GP.** The effects of toxic substances on the activated sludge microfauna. *Desalination.* 2007;211:177-191.
15. **Smets IY, Banadda EN, Deurinck J, Renders N, Jenne R, Van Impe JF.** Dynamic modeling of filamentous bulking in lab-scale activated sludge processes. *Journal of Process Control.* 2006;16:313-319.
16. **Lee S, Somnath B, Tyler CW, Wei IW.** Ciliate populations as bio-indicators at Deer Island Treatment Plant. *Advances in Environmental Research.* 2005;8:371-378.
17. **Monavari S, Guieysse B.** Development of Water Quality Test Kit Based on Substrate Utilization and Toxicity Resistance in River Microbial Communities. *Int J Environ Res.* 2007;1(2):136-142.
18. **Puigaguta J, Salvado H, Tarrats X, García J.** Effects of particulate and soluble substrates on microfauna populations and treatment efficiency in activated sludge systems. *Water Res.* 2007; 41:3168-3176.
19. **Arévalo J, Moreno B, Pérez J, Gómez MA.** Applicability of the Sludge Biotic Index (SBI) for MBR activated sludge control. *J Hazard Mater.* 2009;167:784-789.
20. **Zhou K, Xu M, Liu B, Cao H.** Characteristics of microfauna and their relationships with the performance of an activated sludge plant in China. *Journal of Environmental Sciences.* 2008;20:482-486.
21. **Koivuranta E, Stoor T, Hattuniemi J, Niinimäki J.** On-line optical monitoring of activated sludge floc morphology. *Journal of Water Process Engineering.* 2015;5:28-34.
22. **Luna VM.** Atlas de ciliados y otros microorganismos frecuentes en sistemas de tratamiento aerobio de aguas residuales. México: Universidad Nacional Autónoma de México; 2006.
23. **Isac L, Rodríguez E, Salas MD, Fernández N.** Protozoos en el fango activo. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Biología; 1994.
24. **Zaragoza AM.** Análisis de las correlaciones entre los parámetros operacionales, físico-químicos y biológicos asociados al proceso de fangos activos [Tesis Doctorado Ingeniería del Agua y Medioambiental]. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia; 2012.
25. **Serrano S, Arregui L, Perez B, Calvo P.** Guidelines for the Identification of Ciliates in Wastewater Treatment Plants. Library of congress cataloging in publication data. Londres: IWA Publishing; 2008.
26. **Quiroz HR.** Microflora de aguas residuales. Lambayeque: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo; 2012.
27. **Galal M.** Protozoan diversity in the activated sludge at Benha waste-water treatment plant, Kalubeyia province, Egypt. *Int J Dev.* 2013;2(1):13-20.
28. **Curds CR and Cockburn A.** Protozoa in biological sewage-treatment processes—II. Protozoa as indicators in the activated-sludge process. *Water Research.* 1970;(3):237-249.
29. **Salvado H, Gracia MP, Amigó JM.** Capability of ciliated protozoa as indicators of effluent quality in activated sludge plants. *Water Research.* 1995;29(4):1041-1050.