

GUÍA BIOINDICADORA PARA INGENIEROS

CREADO POR:

Yudy Andrea Londoño-Cañas ¹

Paola Rodríguez ²

Lina Patricia Vega ¹

Gustavo A. Peñuela²

2021

¹ Grupo diagnóstico y control de la contaminación-GDCON, UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

² Grupo de investigación en Ciencias Naturales y ambientales-GICAN, UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
TUNJA



ediciones
USTA
UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS

Guía bioindicadora para ingenieros / Yudy Andrea Londoño-Cañas, Paola Rodríguez, Lina Patricia Vega, Gustavo A. Peñuela. Tunja: Ediciones USTA, 2020.

45 páginas: tamaño 17×24 cm.

ISBN: 978-628-7603-28-8

Primera Edición, 2023

ISBN: 978-628-7603-28-8

GUÍA BIOINDICADORA PARA INGENIEROS

Corrección de Estilo:

Maria Ximena Ariza García

Diagramación

Editorial JOTAMAR S.A.S.

Calle 57 No. 3 - 39.

Tunja - Boyacá - Colombia.

Comité editorial

Fr. Álvaro José

ARANGO RESTREPO, O.P.

Rector

Fr. Omar Orlando

SÁNCHEZ SUÁREZ, O.P.

Vicerrector Académico

Fr. Héctor Mauricio

VARGAS RODRÍGUEZ, O.P.

Vicerrector administrativo y Financiero

María Ximena ARIZA GARCÍA

Directora Ediciones Usta Tunja

Sandra Consuelo DÍAZ BELLO

Directora Unidad de Investigación e
Innovación

Juan Carlos CANOLES VÁSQUEZ

Director Centro de Recursos para el
Aprendizaje y la Investigación

Todos los derechos reservados conforme a la ley. Se permite la reproducción citando fuente.

El pensamiento que se expresa en esta obra, es exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete la ideología de la Universidad Santo Tomás.



Ediciones Usta
Universidad Santo Tomás
2021

Departamento Ediciones Usta Tunja
Universidad Santo Tomás Seccional Tunja

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este libro por cualquier proceso reprográfico o fónico, especialmente por fotocopadoras, microfilme, offset o mimeógrafo.

Ley 23 de 1982.

Contenido

BIOINDICADORES DE ESTABILIDAD DE LODOS ACTIVOS	7
Herramienta de diagnóstico para el tratamiento aerobio de las aguas residuales	
1. INTRODUCCIÓN	8
2 GENERALIDADES DEL PROCESO DE TRATAMIENTO	9
3 GENERALIDADES DE LOS MICROORGANISMOS	12
4 MONTAJE EXPERIMENTAL	20
4.1 Montaje experimental	20
4.2 Inóculo	21
4.3 Agua residual sintética.	22
4.4 Estrategia operacional	22
5 ANÁLISIS DE MICROFAUNA	21
5.1 Floc	24
5.2 Protozoos	26
5.2.1 Flagelados	26
5.2.2 Ciliados libres.	27
5.2.3 Ciliados fijos	33
5.2.4 Rhizopoda o Amiboidea	36
5.3 METAZOOS.	38
5.3.1 ROTÍFEROS	38
5.3.2 ANÉLIDOS.	40
6 AGRADECIMIENTOS	42
7 REFERENCIAS	43

Lista de figuras

Figura 1. Aspectos del estudio y evaluación del floc en el sistema de lodos activados.	13
Figura 2. Representación esquemática del Floc en el lodo activado, tomado de [2].. . . .	14
Figura 3. Red trófica en los lados activos tomada y modificada de [7]	14
Figura 4. Clasificación de los principales grupos de protozoos presentes en el lodo activo.	14
Figura 5. Presencia de microorganismos en función del tiempo de residencia hidráulico y la carga orgánica presente. Tomado de [10]. . . .	17
Figura 6. Montaje experimental del sistema aerobio empleado en la experimentación.. . . .	20
Figura 7. Estructura, composición y color del floc a una edad de lodo alta.	24
Figura 8. Estructura, composición y color del floc a una edad de lodo baja.	24
Figura 9. Protozoo <i>Entosiphon</i>	26
Figura 10. Protozoo <i>Peranema</i>	26
Figura 11. Protozoo <i>Paramecium Caudatum</i>	27
Figura 12. Protozoo <i>Paramecium Bursaria</i>	27
Figura 13. Protozoo <i>Litonotus</i>	29
Figura 14. Protozoo <i>Aspidisca</i>	29
Figura 15. Protozoo <i>Prorodon</i>	31
Figura 16. Protozoo <i>Holosticha</i>	31
Figura 17. Protozoo <i>Blepharisma</i>	33
Figura 18. Protozoo <i>Epistylis</i>	33
Figura 19. Protozoo <i>Vorticella</i>	35
Figura 20. <i>Tokophrya Suctorio</i>	35
Figura 21. Protozoo <i>Arcella</i>	36
Figura 22. Protozoo <i>Centropyxis</i>	36
Figura 23. Protozoo <i>Ameba Desnuda</i>	38
Figura 24. Metazoo <i>Rotaria</i>	38
Figura 25. Metazoo <i>Lecane</i>	40
Figura 26. Metazoo <i>Aelosoma Variegatum</i>	40

Lista de abreviaciones

DQO: Demanda Química de Oxígeno (mg/L)

DBO: Demanda Biológica de Oxígeno (mg/L)

F/M: Relación alimento/microorganismos (kgDBO/kgSSLM·d)

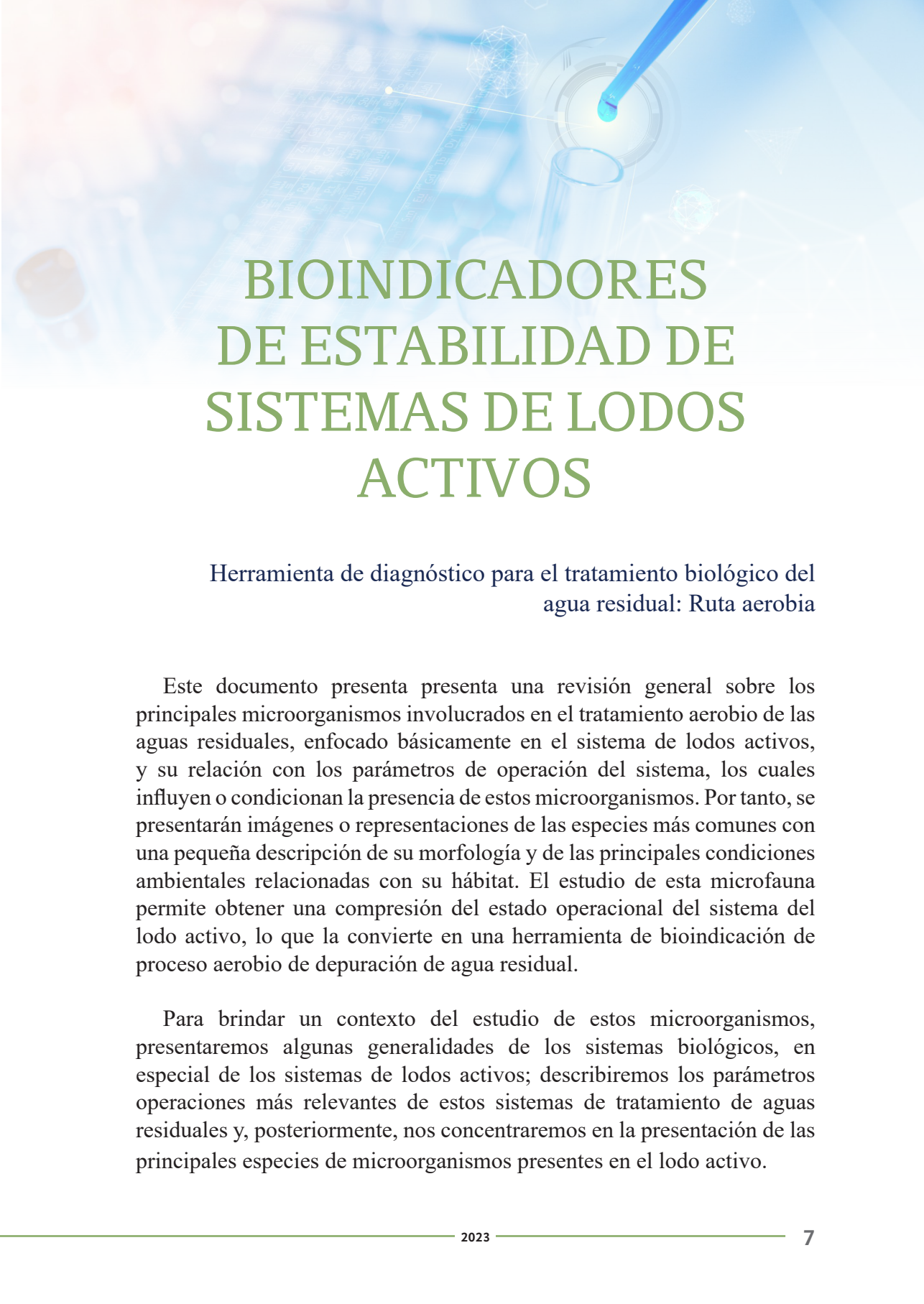
SSLM: Sólidos Suspendidos Volátiles del Licor de Mezcla (kg)

SSV: Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L)

Lv: Tasa de carga orgánica volumétrica (kgDBO/m³·d)

TRH: Tiempo de retención Hidráulica (horas)

OD: Oxígeno Disuelto (mg/L)



BIOINDICADORES DE ESTABILIDAD DE SISTEMAS DE LODOS ACTIVOS

Herramienta de diagnóstico para el tratamiento biológico del
agua residual: Ruta aerobia

Este documento presenta una revisión general sobre los principales microorganismos involucrados en el tratamiento aerobio de las aguas residuales, enfocado básicamente en el sistema de lodos activos, y su relación con los parámetros de operación del sistema, los cuales influyen o condicionan la presencia de estos microorganismos. Por tanto, se presentarán imágenes o representaciones de las especies más comunes con una pequeña descripción de su morfología y de las principales condiciones ambientales relacionadas con su hábitat. El estudio de esta microfauna permite obtener una comprensión del estado operacional del sistema del lodo activo, lo que la convierte en una herramienta de bioindicación de proceso aerobio de depuración de agua residual.

Para brindar un contexto del estudio de estos microorganismos, presentaremos algunas generalidades de los sistemas biológicos, en especial de los sistemas de lodos activos; describiremos los parámetros operaciones más relevantes de estos sistemas de tratamiento de aguas residuales y, posteriormente, nos concentraremos en la presentación de las principales especies de microorganismos presentes en el lodo activo.

1 INTRODUCCIÓN

La problemática de contaminación de las fuentes de aguas naturales, a causa del vertimiento de efluentes residuales con altas cargas de material orgánico, ha sido abordada desde hace ya varias décadas a fin de reducir los impactos ambientales y los problemas de salud pública. La reducción de estas cargas contaminantes se ha logrado a través de la implementación de procesos fisicoquímicos y biológicos, siendo los biológicos muy atractivos para eliminar el material orgánico disuelto debido a sus altas eficiencias y bajos costos de operación.

De acuerdo al objetivo y a la caracterización del agua residual (doméstica o industrial) es posible implementar un sistema biológico de tipo aerobio o anaerobio. Siendo los anaerobios muy interesantes desde una perspectiva de recuperación de energía y para el tratamiento de efluentes residuales con cargas orgánicas volumétricas muy altas. Por otro lado, los sistemas aerobios son sistemas muy eficientes para remover la materia orgánica disuelta biodegradable, ya que generan clarificados con concentraciones muy bajas de DQO e incluso son alternativas potenciales para la remoción de nutrientes. Sin embargo, en cuanto a la remoción de coliformes y organismos patógenos, la eficiencia es baja, y generalmente insuficiente, en el cumplimiento de los requisitos de calidad de los cuerpos de agua receptores, debido al reducido tiempo de retención en las unidades de tratamiento [2].

En la remoción de desechos orgánicos biodegradables a través de los sistemas de tratamiento aerobio, intervienen un grupo de microorganismos que son los responsables de la remoción de los compuestos orgánicos. Entre estos microorganismos podemos encontrar procariontes, un ejemplo son las bacterias; y eucariontes, en los cuales encontramos, hongos microscópicos, algas, protozoos, nemátodos y rotíferos [1][3]. Estos microorganismos transforman una gran proporción del material orgánico disuelto, fácilmente biodegradable, a CO_2 , agua y más células vivas o sólidos biológicos, los cuales pasarán a ser parte de la conformación del floc.

Esta guía tiene como objetivo brindar al usuario un acercamiento al uso de los bioindicadores de sistemas de lodos activados como una herramienta de diagnóstico y control del proceso biológico. Esto con el fin de lograr las condiciones adecuadas para una eficiencia requerida, así como una herramienta clave para la prevención y/o detección de posibles problemas de operación.

2 GENERALIDADES DEL PROCESO DE TRATAMIENTO

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales son procesos complejos que dependen de factores que pueden incidir positiva o negativamente sobre el rendimiento del mismo. Estos factores están relacionados con el diseño de la planta, las características del efluente a tratar, la presencia adecuada de nutrientes, la aireación, la temperatura, el pH, y la relación alimento/microorganismos (F/M), entre otros. Estos factores inciden de una u otra forma en la estructura y/o conformación de la comunidad microbiana, afectando el tamaño de las poblaciones de los diversos grupos que la componen. Por tanto, algunos microorganismos se comportan como bioindicadores, ya que su presencia, abundancia y sus características estructurales están condicionadas por el medio en que se desarrollan. Estos factores tienden a cambiar al modificarse las condiciones del medio de reacción. De ahí la importancia del estudio de estos microorganismos, ya que su ausencia o presencia y abundancia, pueden indicar efectos de un factor ambiental de una forma cualitativa [4].

| Relación F/M (alimento/microorganismos)

El concepto F/M se define como la carga de alimento o sustrato (DQO o DBO) suministrada por día por unidad de biomasa en el reactor. Se expresa como Kg de DQO o DBO aplicada por Kg de sólidos suspendidos volátiles del licor de mezcla (SSLM) por día ($\text{kgDBO/kgSSLM}\cdot\text{d}$). Esta relación F/M es el criterio que se utiliza comúnmente para manejar la carga de un sistema de lodos activos, y se controla con el tiempo de retención celular o edad del lodo y la tasa volumétrica de carga [3].

Tabla 1. Clasificación de los lodos activados en función de la edad del lodo y la relación de F/M [2].

Edad del lodo	Edad del lodo (días)	Relación F/M (kgBDO/kgSSLM·d)	Aplicación
Baja	14-10	0.25-0.50	Lodo activo convencional
Alta	18-30	0.07-0.15	Aireación extendida

| Tiempo medio de retención celular o edad del lodo

El tiempo de retención de lodos expresado en días, presenta una medida promedio del tiempo en que los lodos biológicos permanecen dentro del tanque de reacción. Generalmente, la concentración total de lodo presente en el licor mixto varía entre 800 y 6000 mg/L, donde aproximadamente entre el 40 a 85% de los sólidos suspendidos totales son considerados material orgánico, cuantificado como sólidos suspendidos volátiles (SSV) [3].

| Tasa de carga orgánica volumétrica

La tasa de carga orgánica volumétrica es el principal parámetro de diseño de los sistemas biológicos. Este parámetro representa la relación entre el flujo y la concentración, criterio de gran importancia en el tratamiento biológico del agua residual industrial (donde solo el criterio del tiempo de retención es insuficiente). La tasa de carga orgánica volumétrica se expresa en términos de kgDBO/m³·d.

Para los tratamientos biológicos de lodos activos, la edad del lodo suele ser del orden de 4 a 10 días, el tiempo de retención hidráulica (TRH) en un rango estimado de 6 a 8 horas y la relación F/M suele estar reportada en un rango de 0,25 a 0,50 kg DBO/kg SSLM. Es importante resaltar que la biomasa extraída del sistema, el lodo excedente, todavía requiere estabilización [2].

| Configuración hidráulica del sistema.

De acuerdo con el objetivo que se tenga para el proceso de lodos activados se establece generalmente la configuración del reactor. Estas configuraciones están muy ligadas a las condiciones de flujo, donde el flujo pistón y de mezcla completa suelen ser los mas usados. Los sistemas de lodos activos empleados para la remoción de nutrientes presentan usualmente configuraciones de flujo pistón. Adicionalmente, existen clasificaciones de acuerdo con el flujo, el cual puede ser continuo, o intermitente, como los reactores secuenciados por lotes conocidos como los SBR.

| pH

El pH o la concentración de iones hidronio (H_3O^+) es un parámetro crucial de calidad del agua para todas las matrices naturales y residuales. Su determinación es fundamental en el tratamiento del agua residual ya que el intervalo de pH idóneo para la existencia y desarrollo de la vida biológica es muy estricto y limitado [5]. En los tratamientos aeróbicos el control del pH juega un papel clave para los diferentes grupos de microorganismos involucrados en el proceso, los cuales mantienen una actividad adecuada en un rango de pH de 6,5 a 8,5.

| Oxígeno Disuelto (OD)

La disponibilidad de OD es una condición de gran importancia para que pueda ocurrir el proceso de autodepuración de los cuerpos de agua. Sin embargo, debido a la baja solubilidad del oxígeno en el medio acuático, es necesario el tratamiento de las aguas residuales previo a su vertimiento en fuentes de aguas naturales.

En los procesos de lodo activado, al funcionar bajo un metabolismo aerobio, el suministro de oxígeno y las concentraciones de OD toman una gran relevancia en el proceso de operación y evaluación del sistema biológico. La cantidad de oxígeno que se suministra al tanque de aireación en el sistema de lodos activados debe ser suficiente para satisfacer la demanda de la población microbiana y mantener un residual de 2 mg/L [6].

3 GENERALIDADES DE LOS MICROORGANISMOS

El crecimiento biológico en un sistema de lodos activos es de tipo suspendido y se presenta gracias a la formación de aglomerados o flóculos de diversos tamaños y consistencias, conformados por las diferentes poblaciones microbianas. Lo interesante es que, bajo la conformación del floc, los microorganismos obtienen un aumento en superficie de contacto con la materia orgánica a degradar, ofreciendo altas eficiencias bajo un régimen hidráulico completamente mezclado. Este floc puede separarse de la fase acuosa a través de procedimientos físicos como la sedimentación, permitiendo la entrega de un efluente clarificado al cuerpo de agua receptor.

En la operación y monitoreo del sistema aerobio, la evaluación y análisis del floc es clave para controlar el funcionamiento del proceso. En la figura 1 se muestran los factores más relevantes que requieren ser considerados en el estudio del floc y de la microbiota como bioindicador del lodo activo.



Figura 1. Factores de estudio y evaluación del flóculo en un proceso de lodo activado.

La floculación ocurre debido a la formación de una matriz gelatinosa, que permite la aglutinación de las bacterias, protozoos y otros microorganismos responsables de la eliminación del material orgánico, en flóculos macroscópicos. Los flóculos individualmente son mucho más grandes que los microorganismos, lo que facilita su sedimentación [2].

Los flóculos están constituidos tanto por células biológicas como por partículas de naturaleza orgánica e inorgánica; su tamaño varía desde 1 micra hasta 1000 micras [3]. Cuanto mayor sea el tamaño del flóculo, mayor será el área de asentamiento de los microorganismos. De igual manera, entre más compacto sea, mayor estabilidad en la diversidad de las especies que lo conforman. La figura 2 muestra la representación esquemática del floc de un sistema de lodos activos.

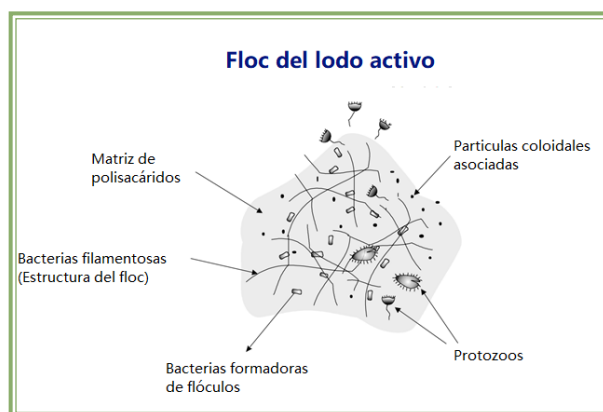


Figura 2. Representación esquemática del Floc en el lodo activo, tomado de [2].

No existe una relación general entre la morfología del flóculo y su actividad. No obstante, la comprensión de la estructura y composición del flóculo es un tema crucial para el óptimo funcionamiento del sistema de lodos activados, ya que se puede establecer una relación clara entre la carga másica, la relación F/M y su aspecto. Por tanto, es interesante analizar la relación entre el estado del flóculo (densidad, tamaño, color, composición, etc.) y la microfauna presente, con las condiciones de operación del reactor (relación F/M, pH, oxígeno disuelto, tipo de agua residual, etc). Es importante hablar un poco sobre esa composición microbiana y la red

trófica presente en un sistema de lodos activos, por lo que, a continuación, se describe cada uno de ellos.

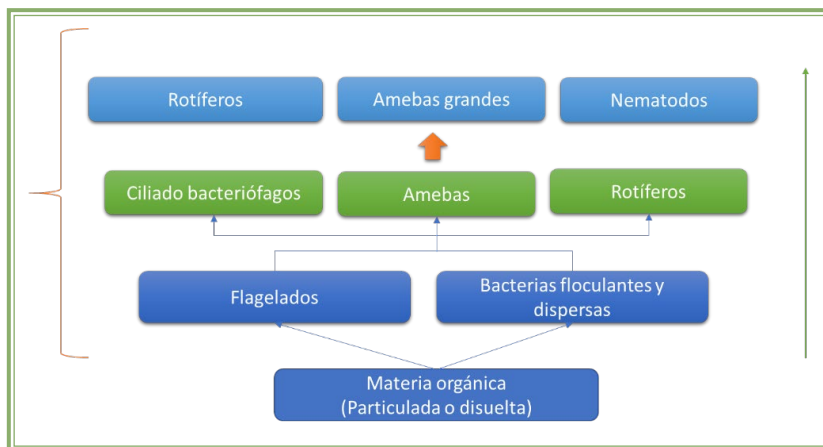


Figura 3. Red trófica en sistemas de lodos activos tomada y modificada de [7].

Bacterias

Las bacterias son microorganismos procariotas de tipo unicelular. A nivel morfológico son redondas (cocos, diplococos), cilíndricas (bacilos), curvadas (vibriones) o tipo filamentosas. Las bacterias pueden ser autótrofas o heterótrofas.

En un sistema de lodos activos, las bacterias son los microorganismos más abundantes, los cuales constituyen cerca del 95% de la proporción total de la biomasa. Pueden existir más de 300 especies, todas ellas aisladas del licor mezclado [3]. Generalmente, estos organismos unicelulares se desarrollan de forma natural en el agua residual y son responsables de la oxidación de los compuestos orgánicos. Las bacterias contribuyen a la producción de polisacáridos y materiales tipo poliméricos que favorecen la floculación de la biomasa. Los principales géneros reportados son [3]:

- *Corynebacterium*
- *Comomonas*
- *Zooglea*

- *Pseudomonas*
- *Bacillus*
- *Achromobacter*
- *Brevibacterium*
- *Acineto bacter*
- *Organismos Filamentosos (Sphaerotilus, Beggiatoa)*
- *Bacterias autotróficas nitrificantes (Nitrosomonas y Nitrobacter)*
- *Bacterias sulfurosas fototróficas (Rhodospirillaceae)*

| Hongos

Los hongos son organismos eucariotas, multicelulares y heterótrofos de metabolismos aerobios [6]. Estos organismos, sumados con las bacterias, son los principales actores que intervienen en la descomposición del material orgánico. Es importante resaltar que las condiciones que brinda un sistema de lodos activos, no son propicias para el desarrollo de hongos. No obstante, dependiendo de las condiciones del sistema, es posible observar la formación de masas filamentosas o micelios. El crecimiento de hongos puede tener lugar a valores de pH bajo (a un valor óptimo de 5,6), en presencia de efluentes con toxicidad o con deficiencia de nitrógeno, ya que los hongos requieren cerca de la mitad del nitrógeno demandado por las bacterias. Algunos géneros encontrados en los lodos activados son los siguientes [3]:

- *Geotrichium*
- *Penicillium*
- *Cephalosporium*
- *Cladosporium*

| Protozoarios

Los protozoarios son un grupo de organismos eucariontes y unicelulares que pertenecen al reino protista. Generalmente son aerobios, heterótrofos, o facultativos anaerobios, aunque algunos pocos son anaerobios. Los

protozoarios controlan la concentración de bacterias libres y las partículas en suspensión, permitiendo obtener efluentes clarificados de mayor calidad. Adicionalmente, funcionan como indicadores directos de condiciones de toxicidad, debido a la sensibilidad que tienen frente a la presencia de compuestos tóxicos y a los cambios en la concentración de oxígeno. Por esta razón, se emplean como indicadores de operación y funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas [8].

Los principales grupos son los siguientes:



Figura 4. Clasificación de los principales grupos de protozoos que componen el lodo activo.

a. Flagelados

Son protozoos pequeños de 5-20 μm , de forma ovalada o alargada. Su movilidad viene dada por uno o más flagelos que emergen en posición apical o subapical. Una presencia elevada en los reactores suele relacionarse con la primera fase del arranque del sistema, específicamente cuando las poblaciones de los ciliados no están plenamente desarrolladas [8].

Indicador: Una presencia abundante en un fango estable puede estar relacionado con problemas de oxigenación del mismo o una aplicación excesiva de carga orgánica [8].

b. Ciliados

Los ciliados representan un rol importante en el proceso de fangos activos. Estos organismos favorecen de manera directa la clarificación del efluente mediante la floculación y la depredación de bacterias libres [8].

Los ciliados se clasifican en una serie de grupos ecológicos de acuerdo a su modo de locomoción y sus hábitos de alimentación. Entre estos se encuentran [9]:

- **Ciliados libres nadadores:** Éstos se encuentran nadando libremente entre los espacios de los flóculos. Tienen formas ovales, redondeadas, alargadas con un tamaño entre 20-400 μm , y se mueven mediante cilios (*Paramecio*, *Blepharisma*, *prorodon*). Indicador: Buen proceso de fangos activos.
- **Ciliados reptantes:** Éstos tienden a desplazarse sobre el flóculo y se alimentan de bacterias libres (*Aspidisca*). Indicador: Buena calidad del lodo.
- **Ciliados sésiles o pendulados:** Son ciliados que se encuentran fijos al flóculo. Estos ciliados pueden encontrarse en forma individual o formando colonias y se alimentan de bacterias (*Vorticella*, *Opercularia*, *Epystilis*). Indicador: Son comunes en un fango activo estable [8].

c. Rhizopoda o Amiboidea

Este protozoo se identifica por la presencia de pseudópodos (falsos pies), los cuales se utilizan en función del movimiento y alimentación (fagocitosis). Su forma y tamaño pueden variar entre 10-200 μm [8].

Se pueden encontrar como amebas desnudas o amebas testadas (amebas testáceas). Indicador: Relacionadas con ingreso de carga orgánica alta.

| Metazoos

En los fangos activos, los metazoos no suelen ser tan abundantes en comparación con la presencia de los protozoos. En las aguas residuales se encuentran generalmente rotíferos y nemátodos.

| Rotíferos

Los rotíferos son animales microscópicos, multicelulares, aerobios y heterótrofos, son altamente eficientes en el consumo de bacterias y material orgánico particulado [6]. El tamaño de un rotífero fluctúa entre las 100 y las 500 micras. Su presencia en el medio puede indicar un proceso aerobio eficiente [8].

En lodos activos, los rotíferos presentes suelen pertenecer a dos órdenes principales:

- *Bdeloidea* (*Philodina* y *Habrotocha*)
- *Monogononta* (*Lecane* y *Notomata*)

Indicador: Indican tiempos de retención medio altos.

| Nemátodos

Gusanos nematelmintos redondos, con aparato digestivo. Son generalmente parásitos intestinales del hombre y animales. Entre ellos se encuentran:

- *Ascaris lumbricoides*
- *Enterobius vermicularis*

Indicador: indica condiciones de operación con tiempos de retención medio-alto. Este tipo de organismo es muy común en filtros percoladores.

La comunidad microbiológica en el lodo activo puede ser muy variable y está altamente influenciada por la naturaleza del suministro alimenticio (la variación en la calidad del agua da lugar al desarrollo de comunidades microbianas con diferente composición), la concentración del alimento, la turbulencia (efecto de la aireación y la mezcla), la temperatura, los tiempos de aireación y la concentración de lodo (edad del lodo). El esquema Patterson muestra la dinámica en la variación de estas poblaciones con respecto al tiempo de residencia y la carga orgánica.

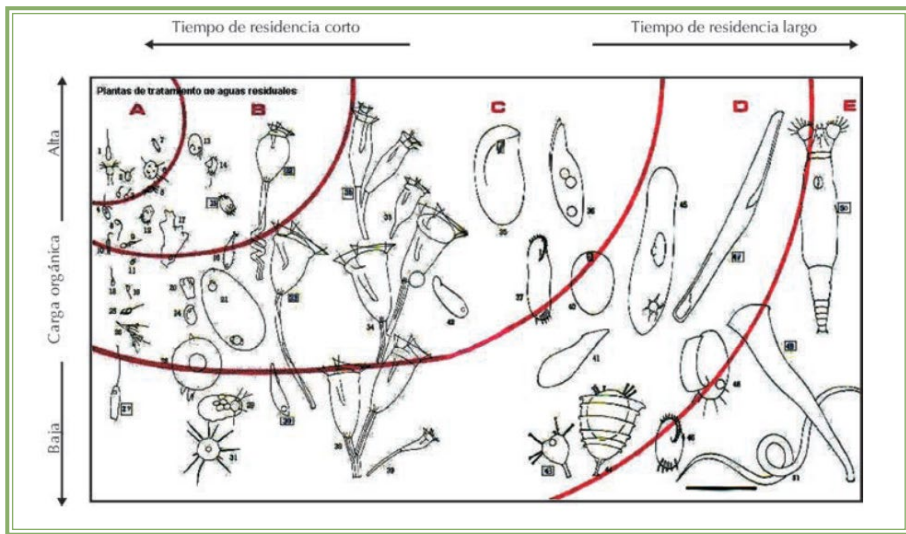


Figura 5. Representación de la presencia de poblaciones microbianas en función de la edad del lodo y la carga orgánica presente. Tomado de [10].

4 APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE LODOS ACTIVOS A ESCALA DE LABORATORIO

4.1 Montaje experimental

Se implementó un sistema aerobio semicontinuo construido en acrílico con un volumen útil de 4 L. La biomasa tipo aerobia fue dispuesta en el reactor de forma suspendida. La aireación se realizó por medio de bombas de pecera y la agitación se mantuvo por medio de un agitador mecánico,

con lo que se logró mantener condiciones aerobias en el reactor y generar una hidráulica tipo mezcla completa. El volumen de alimentación fue suministrado mediante una bomba peristáltica que fue regulada de acuerdo con el TRH de 24 horas. El reactor funcionó en semicontinuo con ayuda de un temporizador digital, el cual fue configurado para trabajar a intervalos de tiempo cumpliendo así un total de 16 horas de aireación, agitación y alimentación y 8 horas de inactividad.



Figura 6. Montaje experimental del sistema aerobio empleado en la experimentación.

El efluente del sistema fue recolectado en una unidad de sedimentación, donde posteriormente fue retornado al reactor. La purga se realizó directamente del tanque de aireación de acuerdo con la edad del lodo de la fase experimental.

4.2 Inóculo

El sistema fue inoculado con un lodo aerobio proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas (Aguas Claras) ubicada en el municipio de Bello, Antioquia. La muestra de lodo fue caracterizada mediante la determinación de SST, SSV e IVL, y se realizó la observación al microscopio para determinar el estado de la biomasa.

4.3 Agua residual sintética

El agua residual sintética se preparó simulando un agua residual industrial del proceso de extracción de almidón de papa. La concentración de la DQO empleada fue de 1000 mg/L. Se adicionó una solución de macro y micronutrientes de acuerdo con lo reportado por Molina [11] para sistemas aerobios.

4.4 Estrategia operacional

El reactor fue operado durante 126 días a través de 5 fases de operación que consistieron en el arranque y aclimatación, y cuatro fases posteriores correspondientes a la variación de la edad del lodo. La tabla 2 presenta un resumen de las condiciones experimentales empleadas para la operación del sistema.

Tabla 2. Resumen de la estrategia operación del sistema aerobio.

Fases	Periodo (días)	TRH (horas)	θ_c (días)	Purga de lodos (mL)	Fo (mg DQO/L)
1-Arranque	0-66	24	20	200	500/1000
2	67-82	24	20	200	1000
3	85-103	24	10	400	1000
4	105-115	24	8	500	1000
5	117-126	24	4	1000	1000

5 ANÁLISIS DE MICROFAUNA

A continuación se presenta la descripción de los flóculos y de las especies encontradas en el desarrollo de esta degradación por lodos activos a escala de laboratorio.



5.1 Floc

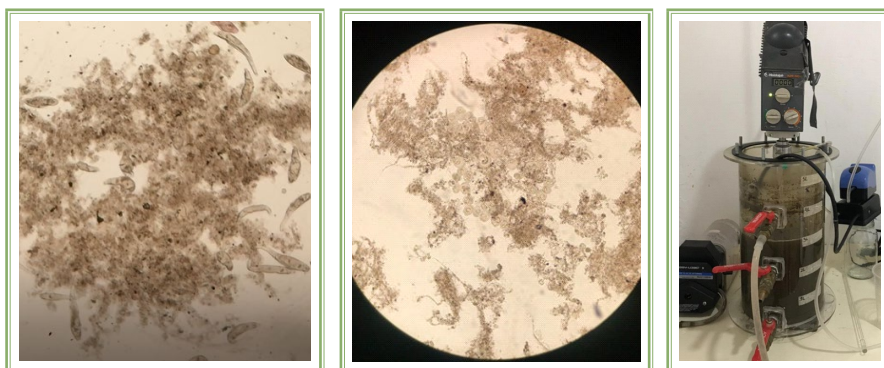


Figura 7. Estructura, composición y color del floc a una edad de lodo alta.

Descripción: Para una edad de lodo alta, los flóculos se presentan grandes y densos, con velocidad de sedimentación alta e índice volumétrico bajo. Color café verdoso oscuro.

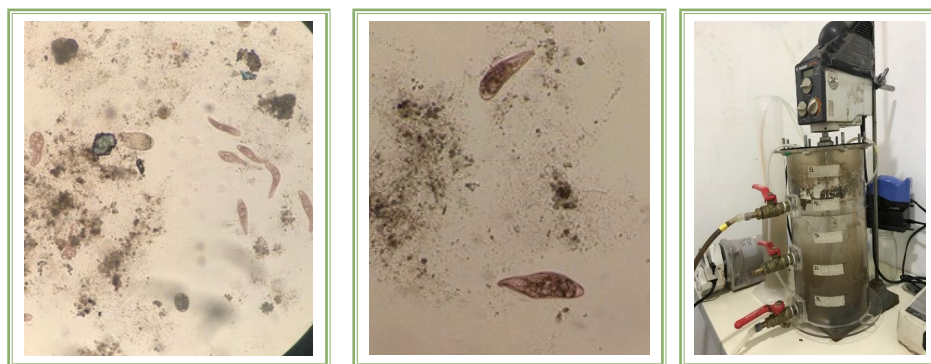


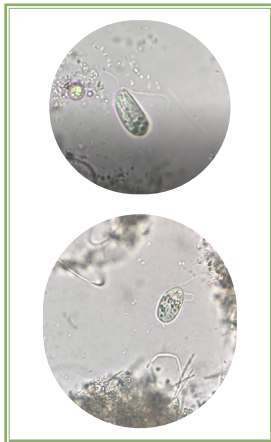
Figura 8. Estructura, composición y color del floc a una edad de lodo baja.

Descripción: Para una edad de lodo baja, los flóculos se presentan dispersos y con baja densidad, con velocidad de sedimentación baja e índice volumétrico alto. Color café marrón claro.



5.2 Protozoos

5.2.1 Flagelados



Tomado [10]

ENTOSIPHON

Célula con dos flagelos, un flagelo anterior y otro móvil trasero con el cual digieren detritos y bacterias. Tamaño 20-30 μm [10].

Bioindicación: Asociados a condiciones de baja carga [12].

Figura 9. Protozoo *Entosiphon*.

PERANEMA

Célula de forma alargada con un flagelo predominante que se extiende en sentido del movimiento. Cuenta con un pequeño aparato digestivo, su tamaño varía entre 20-100 μm [10].

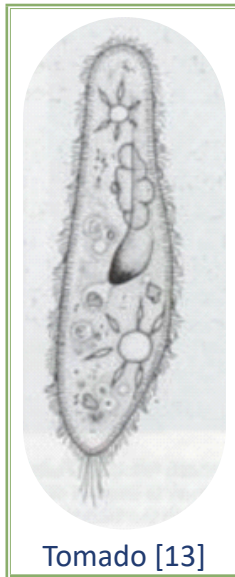
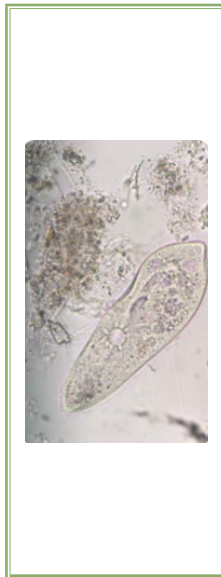
Bioindicación: Se encuentra en aguas ricas en materia orgánica [1]. Su presencia es limitada en fangos maduros, normalmente se encuentra en las primeras fases de operación del sistema. Indica buenos rendimientos de depuración [12].



Tomado [1]

Figura 10. Protozoo *Peranema*.

5.2.2 Ciliados libres



Tomado [13]

PARAMECIUM CAUDATUM

Ciliado con forma de pie con dos vacuolas contráctiles típicamente con canales colectores radiantes. Presenta abundantes penachos de cilios y una boca que se encuentra cerca de la mitad del cuerpo de la célula [10].

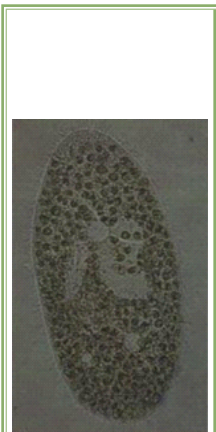
Bioindicación: Indicador de ambientes con elevada carga orgánica. Se alimenta normalmente de bacterias [8].

Figura 11. Protozoo *Paramecium Caudatum*.

PARAMECIUM BURSARIA

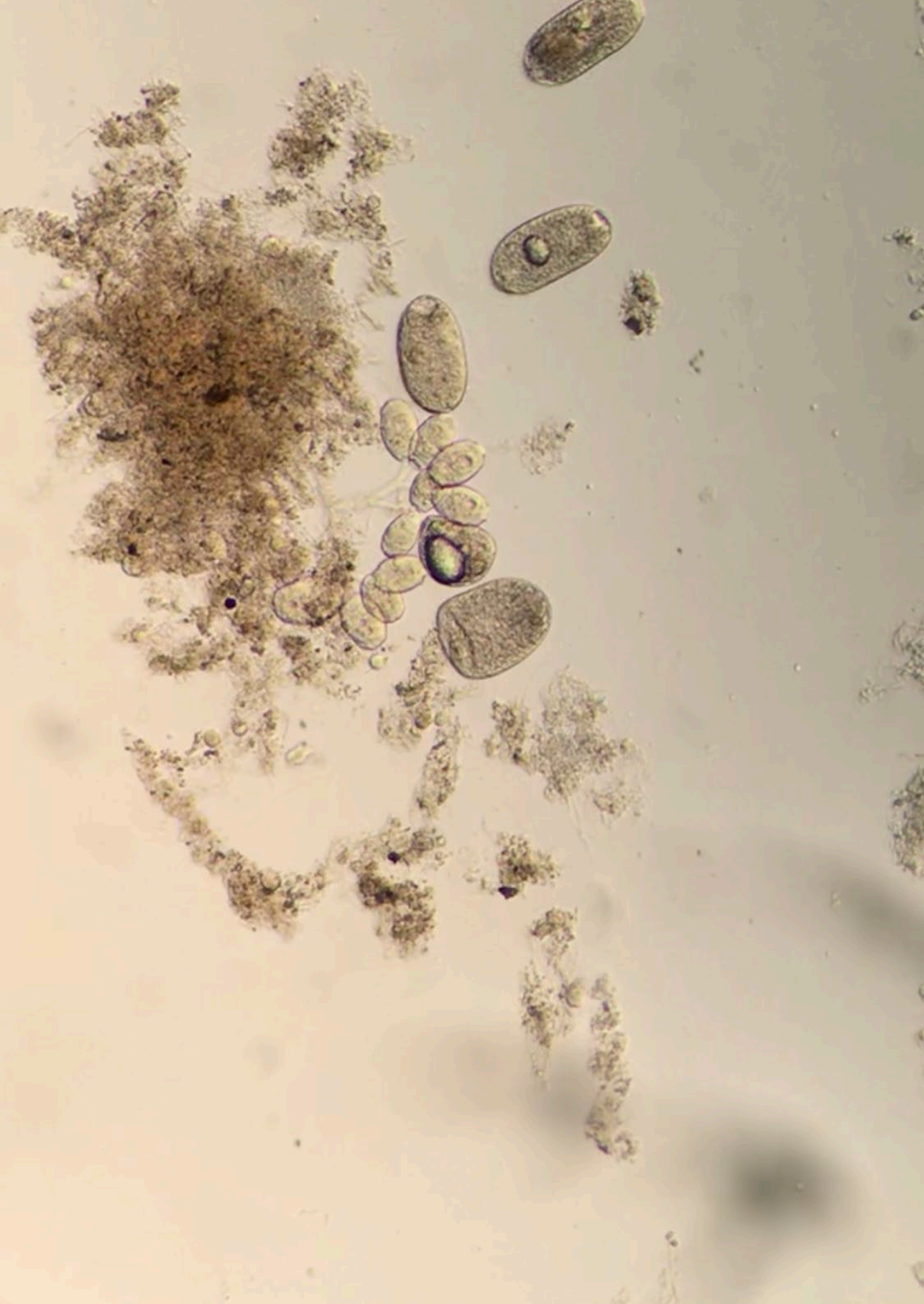
La célula está cubierta por cilios. La boca aparece como una cavidad estrecha que contiene cilios densamente empaquetados. La célula contiene muchas células verdes simbióticas que proporcionan energía en forma de productos liberados por la fotosíntesis.

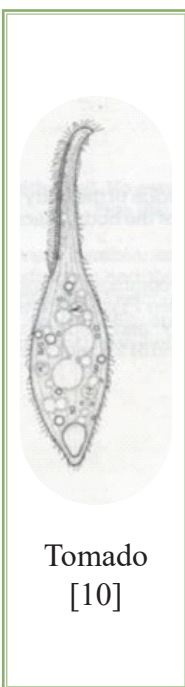
Bioindicación: Puede estar asociado a cargas orgánicas altas.



Tomado [13]

Figura 12. Protozoo *Paramecium Bursaria*.





Tomado [10]

LITONOTUS

Es un protozoo ciliado de cuerpo casi plano y de contorno de pez alargado [13]. Los cilios están presentes en huecos paralelos en ambas superficies planas de la célula. Son ciliados depredadores o carroñeros. La región de la boca está en el margen convexo anterior y lateral. El tamaño de la célula es de: 80-110 μm x 12-20 μm [10].

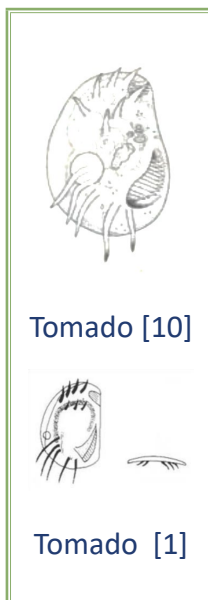
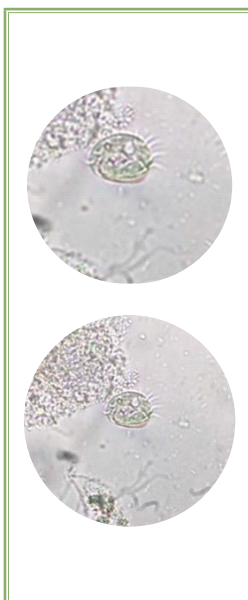
Bioindicación: A baja densidad poblacional se asocia a estabilidad del sistema. Sin embargo, a densidades altas indica deterioro de este. Es común en edades de lodos altas y bajas cargas [14].

Figura 13. Protozoo *Litonotus*.

ASPIDISCA

Protozoo ciliado que se desplace sobre flóculos de los lodos. Es una célula pequeña de forma ovoide y aplanada con cilios pequeños y predominantes, llamados cirros, en la superficie ventral. El largo de la célula esta entre 20 y 100 μm [10]. Se alimenta de bacterias.

Bioindicación: Es característico de condiciones de estabilidad y de buena eficacia del sistema [14] relacionado negativamente con parámetros como DQO, ST y nitratos [13].



Tomado [10]

Tomado [1]

Figura 14. Protozoo *Aspidisca*.



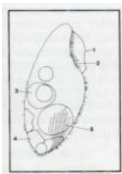


Figura 15. Protozoo *Prorodon*.



Figura 16. Protozoo *Holosticha*.





Tomado [13]

BLEPHARISMA

Células rojas o rosadas con vacuola en el extremo posterior. Las membranas son bloques de cilios adheridos. El tamaño de la célula varía entre 50-350 μm de longitud.

Bioindicación: No es común en lodos activos. Normalmente está relacionada a condiciones de pobre oxigenación. Sin embargo, está relacionado con buenas condiciones nitrificantes y con bajas concentraciones de sólidos en el sistema. Presenta buenos lodos en términos de sedimentación y buena calidad del efluente [13].

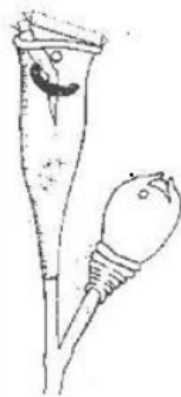
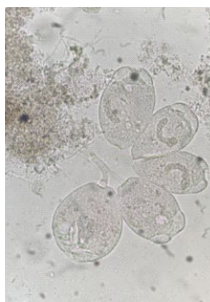
Figura 17. Protozoo *Blepharisma*.

5.2.3 Ciliados fijos

EPISTYLIS

Es un género de ciliados que forman colonias arborescentes. Su pedúnculo es rígido (no contráctil), estriado y longitudinalmente segmentado [16]. Su tamaño celular es de 50-530 μm . Cada célula se contrae individualmente sin contraer el tallo.

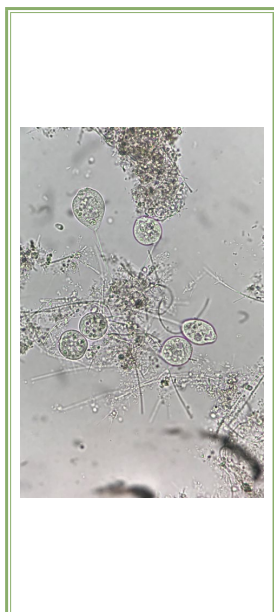
Bioindicación: asociado a buenas condiciones de operación y a efluentes tratados con buena calidad. Asociada a cargas medias [16].



Tomado[1]

Figura 18. Protozoo *Epistylis*.





VORTICELLA

Organismo presente de forma solitaria en el fango, se caracteriza por tener un pedúnculo retráctil. Tamaño de la célula varía desde 20-200 μm .

Bioindicación: Suele estar asociada a un funcionamiento estable de los reactores biológicos[12][8].

Figura 19. Protozoo *Vorticella*.

TOKOPHYA SUCTORIO

Organismo presente de forma solitaria en el fango, se caracteriza por tener un pedúnculo retráctil. Tamaño de la célula varía desde 20-200 μm .

Bioindicación: Suele estar asociada a un funcionamiento estable de los reactores biológicos[12][8].

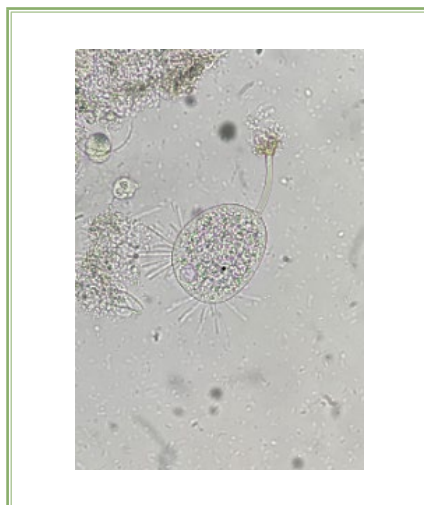


Figura 20. *Tokophrya Suctorio*.

5.2.4 Rhizopoda o Amiboidea



Figura 21. Protozoo *Arcella*.

CENTROPYXIS

Ameba testada, su testa es esférica u ovoide de color marrón debido a los minerales acumulados del ambiente. Tiene irregularesseudópodos que adhieren a las partículas. Su tamaño varía entre 50-320 μm [10].

Bioindicación: Buena calidad de depuración [15].

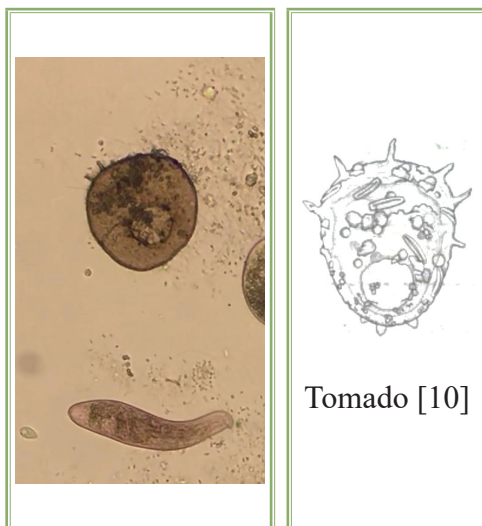
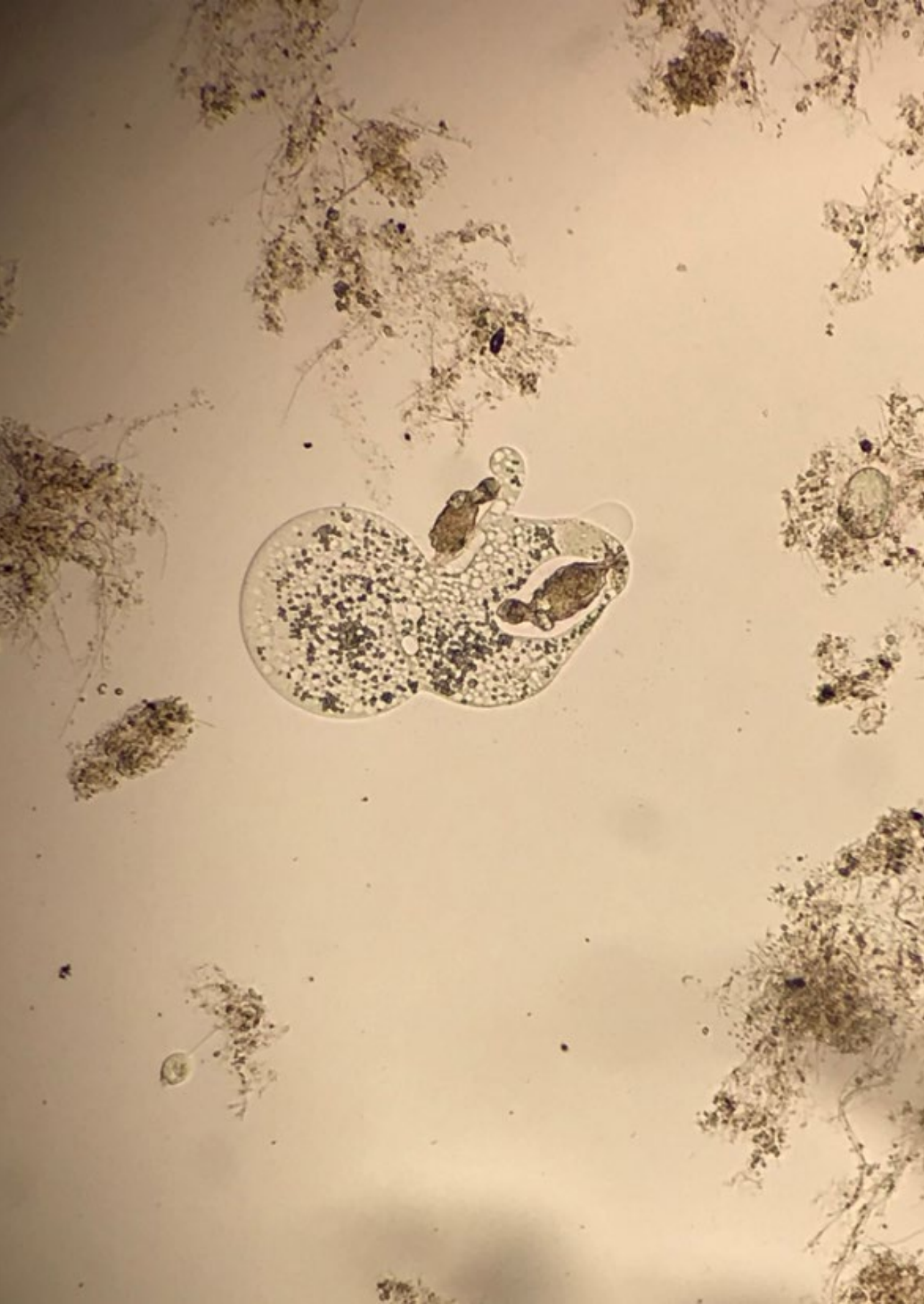
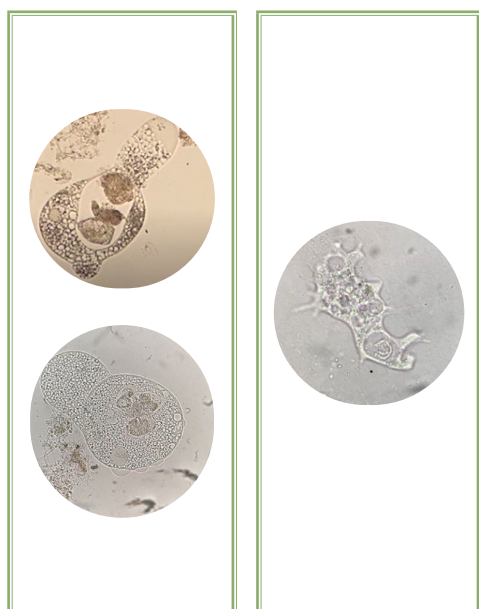


Figura 22. Protozoo *Centropyxis*.





AMEBA DESNUDA

Microorganismo que presenta pseudópodos grandes y redondos, y un solo núcleo predominante. Se alimenta de bacterias, protozoos, etc. Su tamaño varía entre 300-600 μm .

Bioindicación: Asociada a baja eficiencia e inestabilidad de la carga orgánica en el sistema. Incluso, elevadas densidades de población podrían estar asociadas a la presencia de compuestos (vertidos) de difícil degradación [16].

Figura 23. Protozoo *Ameba Desnuda*.

5.3 METAZOOS

5.3.1 ROTIFEROS

ROTORIA

Rotífero que presenta su tronco adelgazado paulatinamente hacia el pie. Su movimiento se da por plegamientos. Su forma es alargada de color pardo y tamaño entre 250-1.000 μm [16].

Bioindicación: Asociado a edades de lodo altas y a una buena calidad del efluente tratado.

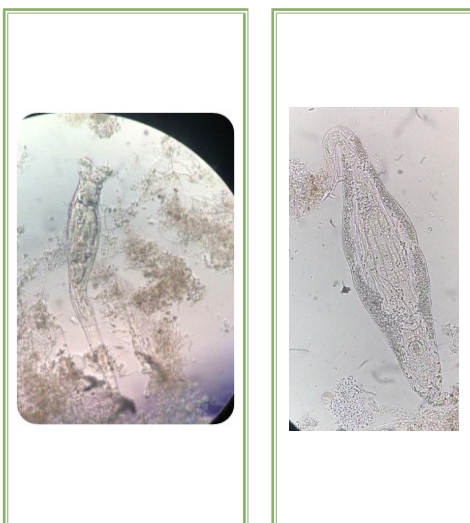
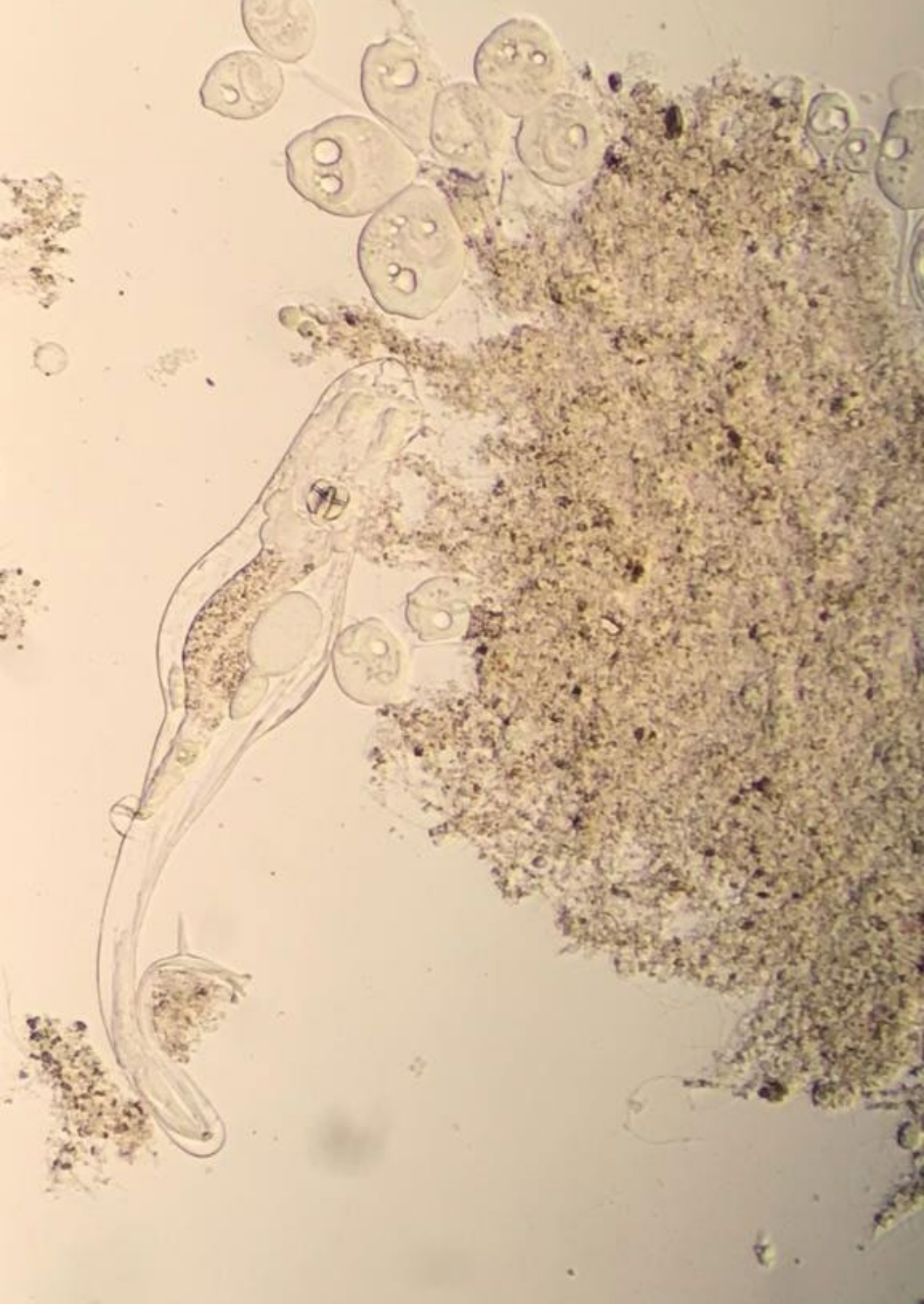
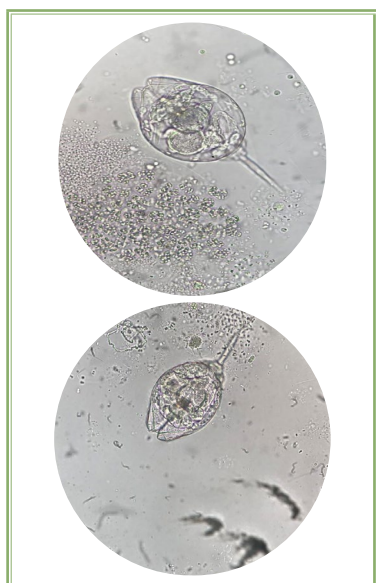


Figura 24. Metazoo *Rotoria*.





LECANE

Rotífero de aspecto globoso o redondeado de pie corto con 1-2 dedos. Su tamaño varía entre 200-300 μm [16].

Bioindicación: Procesos muy estabilizados.

Figura 25. Metazoo *Lecane*.

5.3.2 ANELIDOS

AELOSOMA VARIEGATUM

Gusano rodeado de quetas dorsales que se agrupan en penachos en cantidades de 3 o 4. Tiene vacuolas de color rojo. Su tamaño varía entre 1,5-4 mm.

Bioindicación: Asociado a una Edad de lodo alta (Lodo envejecido)[12].



Figura 26. Metazo *Aelosoma Variegatum*.



6 AGRADECIMIENTOS

Los autores extienden sus agradecimientos al grupo de investigación Diagnóstico y Control de la Contaminación-GDCON de la Universidad de Antioquia y a Minciencias por la financiación de este proyecto.

7 REFERENCIAS

- [1] V. M. Pabello Luna, *Atlas de ciliados y otros microorganismos frecuentes en sistemas de Tratamiento Aerobio de Aguas Residuales*, Primera ed. México.: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2006.
- [2] M. Von Sperling and C. A. Chernicharo De Lemos, “Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions - Volume Two,” p. 634, 2005, doi: 10.5860/CHOICE.45-2633.
- [3] D. M. Gabriela Moeller Ana Cecilia Tomasini Ortiz, “5 MICROBIOLOGÍA DE LODOS ACTIVADOS.”
- [4] T. L. Arias, C. Moretuzzo, M. Ahrens, and R. Ude, “Identificación de Microorganismos Bioindicadores presentes en lodos activos de plantas de tratamientos de aguas residuales,” *Investig. y Estud. la UNA*, vol. 7, pp. 51–71, 2012.
- [5] Metcalf-Eddy, *Ingeniería de las aguas residuales*. Madrid: Interamericana de España, 1995.
- [6] J. A. Romero Rojas, *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño.*, 1ra ed. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000.
- [7] P. Madoni, “A SLUDGE BIOTIC INDEX (SBI) FOR THE EVALUATION OF THE BIOLOGICAL PERFORMANCE OF ACTIVATED SLUDGE PLANTS BASED ON THE MICROFAUNA ANALYSIS,” *Wat. Res.*, vol. 28, no. 1, pp. 67–75, 1994.
- [8] M. M. Vilaseca, “OBSERVACIÓN MICROSCÓPICA DE FANGOS ACTIVADOS EN LOS TRATAMIENTOS DE DEPURACIÓN BIOLÓGICA M.,” *BOLETÍN INTEXTER (U.P.C.)*, vol. 119, 2001.
- [9] R. M. GONZÁLEZ, “ESTUDIO DE LA DINÁMICA DE PROTISTAS Y METAZOOS EN UN REACTOR BIOLÓGICO DE AIREACIÓN PROLONGADA CON MACRÓFITAS EN FLOTACIÓN Y SU RELACIÓN CON LAS VARIABLES FÍSICOQUÍMICAS,” Universidad Politécnica de Valencia, 2016.
- [10] D. J. Patterson and S. Hedley, *Free-living freshwater Protozoa A Colour Guide*. New York: MANSON PUBLISHING, 1992.
- [11] J. F. Molina, C. Rodríguez, and E. B. Bolívar, *Manual de laboratorio procesos biológicos*. 2008.

- [12] L. Isac, E. Rodríguez, L. Salas, N. Fernandez, and A. Zornoza, “Jornada Internacional de Tratamiento y Reutilización en Aguas Residuales. Papel de los Protistas,” Andalucía, España, 2008.
- [13] K. Lucia, S. Vargas, Y. Sulliet, A. Grueso, L. Alberto, and R. Osorio, “Revisión Sistemática Microbiological quality indicators in sewage water treatment systems by activated sludge,” 2017.
- [14] del G. N. y R. N. de la U. de S. (RNM-310) y A. Z. (UTE A.-E. GBS (Laura Isac, Eva Rodríguez [SEAFSA], Lola Salas [Itsmo’94] y Natividad Fernández [UTE SAV-DAM-PRIDES]), “Jornada Internacional de Tratamiento y Reutilización en Aguas Residuales. Papel de los Protistas,” 2008.
- [15] S. Chamorro and G. Vidal, *A g U Tecnologías para la gestiOn del agua TECNOLOGIAS DE TRATAMIENTO DE AGUA MEDIANTE SISTEMAS DE LODOS ACTIVADOS. OBSERVACION MICROSCOPICA DE ORGANISMOS INDICADORES*. Concepción, Chile: Sello Editorial Universidad de Concepción, 2015.
- [16] L. Isac, E. Rodríguez, M. Dolores Salas Natividad Fernández Grupo Bioindicación Sevilla, and B. Pérez-Uz Susana Serrano, “PROTOZOOS EN EL FANGO ACTIVO,” Grupo de bioindicación Sevilla y Zornoza.



Se terminó de editar el libro electrónico en noviembre de 2022 en los talleres de Editorial Jotamar S.A.S.
Tunja, Boyacá, Colombia.
